



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Физико-
технологический
институт

В. Л. ПЕТРОВ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум

Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. Л. Петров

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов дневной формы обучения специальности
14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 621.039.76(076.5)

ББК 31.42я73-5

П30

Рецензенты: зам. директора по науч. работе, канд. физ.-мат. наук И. В. Яρμοшенко (Институт промышленной экологии УрО РАН); начальник конструкторского отдела ООО «Гамма» канд. техн. наук М. Н. Благовещенский

Научный редактор — д-р физ.-мат. наук, проф. Б. В. Шульгин

Петров, В. Л.

П30 Методы и средства обнаружения делящихся материалов: лабораторный практикум / В. Л. Петров. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 99, [1] с.
ISBN 978-5-7996-2176-6

Приведены подробные сведения об алгоритмах поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений, характеристиках детекторов и блоках детектирования гамма- и нейтронного излучений, методах измерения основных технических характеристик блоков детектирования. Содержится описание устройства, особенностей эксплуатации и методов решения задач обнаружения и идентификации радионуклидов комплексами радиационного контроля «Соратник-01».

Библиогр.: 27 назв. Рис. 13. Табл. 5.

Подготовлено кафедрой «Экспериментальная физика».

УДК 621.039.76(076.5)

ББК 31.42я73-5

ISBN 978-5-7996-2176-6

© Уральский федеральный университет, 2017

Условные обозначения

БД	— база данных;
БДО	— база данных объектов;
БДРМ	— база данных радиационного мониторинга;
ВГС	— выносной гамма-спектрометр;
ВП	— военная приемка;
ГСИ	— государственная система обеспечения единства измерений;
ДИН	— детекторы нейтронного излучения;
ДМ	— делящийся материал;
ЖРБ	— журнал радиационной безопасности;
ЗТМ	— ФГУП «Завод точной механики»;
ИИ	— ионизирующее излучение;
ИИИ	— источник ионизирующих излучений;
ИОК	— индикатор оперативного контроля;
ИУП	— интерактивное учебное пособие;
КУНГ	— кузов универсальный негерметизированный
МРЗУ	— модуль (блок) энергонезависимого запоминающего устройства;
МЭД	— мощность эквивалентной дозы гамма-излучения;
НТД	— научно-техническая документация;
ОСГИ	— образцовые спектрометрические гамма-источники;
ОТХ	— основные технические характеристики;
ПЗ	— представитель заказчика;
ПО	— программное обеспечение;
ПП	— плотность потока (частиц);

ППО	— прикладное программное обеспечение;
ПЭВМ	— персональная электронно-вычислительная машина;
РАО	— радиоактивные отходы;
РВ	— радиоактивные вещества;
РК	— радиационный контроль;
РКГ	— комплекс радиационного контроля гражданского назначения;
РМ	— радиационный мониторинг;
РО	— руководство оператора;
РЭ	— руководство по эксплуатации;
СНС	— спутниковая навигационная система;
СИ	— средства измерений;
СКО	— среднеквадратическое отклонение;
СкГД	— сканирующий гамма-детектор;
СРК	— (комплекс) специального радиационного контроля;
СГК	— спектрометрический гамма-канал;
ТУ	— технические условия;
УНИИМ	— Уральский НИИ метрологии;
УПО	— учебное программное обеспечение;
ЭК	— экранирующий конус

Лабораторная работа № 1

Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений

В настоящей лабораторной работе описаны алгоритмы (способы) поиска и обнаружения, положенные в основу той части прикладного ПО «Соратник-01», которое ответственно за обработку результатов измерений и решение задачи обнаружения. Алгоритмы разработаны и запатентованы авторским коллективом сотрудников кафедры экспериментальной физики [1, 2, 3].

Алгоритмы описываются последовательно: сначала кратко, из «первых принципов», изложены теоретические основы построения оптимальных алгоритмов обнаружения; далее рассмотрен простейший случай обнаружения неподвижного источника ИИ при неподвижном комплексе РК; затем последовательно описываются более сложные задачи для случаев «подвижный», т. е. подвижны либо объект контроля, либо комплекс РК, либо и тот и другой.

Алгоритмы совершенствовались по мере накопления опыта проведения испытаний и эксплуатации комплексов РК. В п. 3 подробно описываются проблемы, связанные с большими флуктуациями гамма-фона. П. 4 посвящен описанию алгоритма «Поиск», при помощи которого в значительной степени решается задача обнаружения в условиях повышенного уровня флуктуаций гамма-фона.

Безусловно, что еще на этапе отладки ПО был проведен цикл работ по проверке (верификации) разработанных

алгоритмов на машинных моделях. Средствами ПЭВМ генерировались пуассоновские потоки шумов и сигналов, имитирующие реальные шумы и сигналы на выходе гамма- и нейтронных детекторов (причем имитировались слабые «пороговые» сигналы), и далее с помощью рабочих программ решалась задача обнаружения слабых сигналов. Результаты модельных экспериментов в настоящей работе не приводятся, поскольку их описание заняло бы неоправданно много места. Отметим только, что упомянутые модельные эксперименты позволили учесть практически все нюансы, связанные с реализацией алгоритмов [1, 2]. Добавим, что результаты реальных измерений, полученных при испытаниях и эксплуатации комплекса, полностью подтвердили эффективность разработанных алгоритмов.

1. Алгоритм обнаружения в режиме «неподвижный»

Постановка задачи и теоретические основы

При помощи комплекса РК, содержащего счетные детекторы гамма- и (или) нейтронного излучения, необходимо обнаруживать источник ИИ с очень малой суммарной активностью; а поскольку измерения проводятся в условиях естественного фонового излучения, имеющего, как правило, довольно значительный уровень, то очевидна необходимость разработки и применения *оптимальных алгоритмов обнаружения*.

Алгоритмы работы аппаратуры комплекса РК базируются на классической теории обнаружения, подробно и давно разработанной применительно к задачам радиолокации, и описанной в соответствующей специальной литературе (в частности, в [4–7]).

Задача обнаружения источника ИИ сводится к тому, чтобы на основе анализа результатов измерений уровня детектируемого излучения дать ответ на вопрос о наличии источника ИИ на объекте контроля либо о его отсутствии, причем с заданны-

ми вероятностями ошибок. Эта задача относится к группе простых бинарных задач в условиях априорной неопределенности (т.е. когда перед проведением инспекционного контроля объекта нет информации не только о наличии либо отсутствии источника, но и о величине сигнала, создаваемого источником в детекторе) [4–7].

В результате решения упомянутой задачи возможен один из четырех исходов; соответствующие общепринятые названия исходов и их вероятностей удобно представить в виде табл. 1.1.

В теории обнаружения [4–7] известны несколько оптимальных алгоритмов обнаружения (или правил принятия решения), из которых наиболее часто применяются алгоритмы, основанные на критерии Байеса, когда минимизируется суммарная ошибка ($\alpha + \beta$), либо на критерии Неймана–Пирсона. По критерию Неймана–Пирсона при заданной ошибке α минимизируется β , что приводит к выбору решения с наибольшей мощностью критерия $P_{\text{обн}} = (1 - \beta)$. Поэтому критерий Неймана–Пирсона называют наиболее мощным критерием. Выбор того или иного критерия обнаружения зависит от исходных условий постановки задачи.

Таблица 1.1

Термины и обозначения, используемые в теории обнаружения

№ п/п	Описание исхода при решении задачи обнаружения	Вероятность исхода решения задачи обнаружения	
		Наименование	Обозначение
1	Верна H_0 , выбираем H_0	вероятность правильного неопределения	$P_o = (1 - \alpha)$
2	Верна H_0 , выбираем H_1	вероятность ложной тревоги , ошибка первого рода, уровень значимости критерия	$P_{\text{лт}} = \alpha$

Окончание табл. 1.1

№ п/п	Описание исхода при решении задачи обнару- жения	Вероятность исхода решения задачи обнаружения	
		Наименование	Обозначение
3	Верна H_1 , выбираем H_1	вероятность обнаружения, мощность критерия	$P_{\text{обн}} = (1 - \beta)$
4	Верна H_1 , выбираем H_0	ошибка второго рода, вероятность пропуска	β

В табл. 1.1 приняты следующие обозначения:

H_0 — гипотеза об отсутствии источника на объекте контроля;

H_1 — гипотеза о наличии источника на объекте контроля.

Результатами физических измерений, проводимых с помощью комплекса РК, являются:

- средняя скорость счета фонового потока частиц (квантов) $\bar{b} = B/t_b$, где B — количество импульсов на выходе детектора, зарегистрированных за время измерения фона t_b ;
- средняя скорость счета при наличии контролируемого объекта в поле наблюдения детекторов $\bar{n} = N/t_n$, где N — количество импульсов.

Разность $\bar{a} = (\bar{n} - \bar{b})$, называемая сигналом, т. е. фактически измеряемая детектором средняя скорость счета при контроле объекта за вычетом фона, несет информацию о наличии либо отсутствии излучения на объекте контроля.

Основные формулы алгоритма обнаружения

При выводе формул, на основе которых строится алгоритм обнаружения, должны учитываться следующие особенности измеряемых величин применительно к рассматриваемой задаче:

- отношение сигнал/фон, как правило, мало: $s = \bar{a}/\bar{b} < 0,1$;
- измеренные случайные величины (\bar{n} , \bar{b}) описываются пуассоновским распределением.

Для решения задачи обнаружения с учетом указанных особенностей, как правило, используется критерий отношения правдоподобия [4–6]. Эквивалентным использованию упомянутого критерия (в строго математическом аспекте) является вычисление так называемой «достаточной статистики» [4]:

$$\eta = \frac{\bar{a}^*}{\sqrt{D\{\bar{a}^*\}}}, \quad (1.1)$$

где \bar{a}^* — оценка максимального правдоподобия параметра \bar{a} ;
 $D\{\bar{a}^*\}$ — дисперсия указанной оценки.

Математическое ожидание статистики η равно нулю в случае отсутствия источника при постоянном фоне (рис. 1.1).

Для пуассоновского закона распределения случайных величин \bar{b} и \bar{n} формула (1.1) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{\bar{n} - \bar{b}}{\sqrt{\frac{\bar{n}}{t_n} + \frac{\bar{b}}{t_b}}}. \quad (1.2)$$

Решающее правило (или заключительный этап решения задачи обнаружения) сводится к сравнению статистики η с порогом q_0 :

$$\eta < q_0 \text{ или } \eta \geq q_0. \quad (1.3)$$

При $\eta < q_0$ принимается гипотеза H_0 об отсутствии источника на объекте контроля. При $\eta \geq q_0$ принимается противоположная гипотеза H_1 о наличии источника на объекте контроля.

Порог q_0 вычисляется по тем или иным правилам в зависимости от выбранного критерия обнаружения — критерия Байеса или критерия Неймана–Пирсона. Для формирования порога q_0 по критерию Байеса необходима априорная информация о статистических характеристиках сигнала, а именно о среднем зна-

чении сигнала \bar{a} . Однако до завершения процедуры измерений (первой серии измерений) нам ничего о характеристиках сигнала (и о его наличии либо отсутствии) не известно. Это утверждение, несмотря на очевидность и кажущуюся простоту, является одним из ключевых для логики построения оптимального алгоритма обнаружения. Из него следует, что в нашем случае, т.е. для решения задачи обнаружения применительно к комплексу РК, критерием Байеса воспользоваться невозможно.

Итак, для решения задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности наиболее широкое распространение получил критерий Неймана–Пирсона [4, 5] — наиболее мощный критерий, т.е. его использование позволяет получить максимальную величину (мощность) вероятности обнаружения $P_{\text{обн}} = (1 - \beta)$ (или в терминах математики: позволяет минимизировать ошибку второго рода β при заданном уровне значимости α).

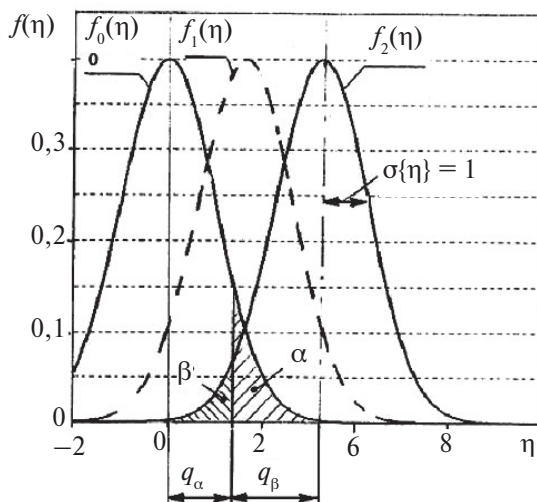


Рис. 1.1. Плотности распределения статистики $f(\eta)$ при различных уровнях сигнала

Для пояснения физического смысла параметра «достаточная статистика» η на рис. 1.1 показаны кривые плотности распределения статистики $f(\eta)$ для трех случаев: $f_0(\eta)$ — сигнал отсутствует; $f_1(\eta)$ — уровень сигнала \bar{a}_1 равен порогу обнаружения q_a ; $f_2(\eta)$ — уровень сигнала \bar{a}_2 соответствует вероятности обнаружения $P_{\text{обн}} = 95\%$. Плотности распределения на рис. 1.1 представляют собой нормальные распределения с дисперсией, равной единице, и математическим ожиданием $M\{\eta\}$, зависящим от среднего значения сигнала \bar{a} . Ось абсцисс проградуирована в значениях среднеквадратического отклонения статистики $\sigma\{\eta\}$ (при $\sigma\{\eta\} = 1$ указанные значения называют квантилями нормального распределения). Показаны порог $q_0 = q_a$, устанавливаемый по задаваемой оператором ошибке 1-го рода a , и значение q_β , по которому вычисляется полученное в результате контроля значение ошибки 2-го рода β (выделено штриховкой).

Рабочие формулы, используемые для подготовки реальных и модельных экспериментов.

Из основных формул (1.2) и (1.3) несложно вывести формулу для минимального значения сигнала \bar{a}_{\min} , регистрируемого аппаратурой при заданных условиях обнаружения:

$$a_{\min} = \frac{q_p^2}{2 \cdot t_n} + q_p \cdot \sqrt{\frac{q_p^2}{4 \cdot t_n^2} + \bar{b} \cdot \left(\frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_b}\right)}, \quad (1.4)$$

где $q_p = q_a \cdot K_f + q_\beta$ — расчетное значение порога обнаружения, выраженное в квантилях нормального распределения;

q_a и q_β — квантили нормального распределения, соответствующие вероятностям ошибок обнаружения α и β ;

K_f — коэффициент коррекции порога для учета флуктуаций фона (подробности о K_f см. в п. 3).

Поскольку при измерениях вблизи a_{\min} отношение сигнал/фон очень мало ($s = a/b < 0,1$), а время измерения t_n обыч-

но не менее 100 с, то формула (1.4) может быть существенно упрощена:

$$a_{\min} \cong q_p \cdot \sqrt{\bar{b} \cdot \left(\frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_b} \right)}. \quad (1.5)$$

По известному минимальному обнаруживаемому значению сигнала \bar{a}_{\min} легко вычислить ОТХ комплекса РК — минимальную обнаруживаемую плотность потока нейтронов или гамма-квантов

$$\Phi_{\min} = \frac{a_{\min}}{\Theta\Phi}, \quad (1.6)$$

где $\Theta\Phi$ — эффективность регистрации детектора (или суммарная эффективность детекторов комплекса РК).

2. Алгоритм обнаружения в режиме «подвижный»

Сначала рассмотрим случай, когда объект контроля с обнаруживаемым источником ИИ (или без него) движется относительно неподвижного комплекса РК.

Форма сигнала на выходе счетного детектора в режиме «Подвижный»

Априорное знание формы сигнала является одним из важнейших условий построения оптимального обнаружителя. В [6, 8] подробно рассмотрена возможность использования известных в радиотехнике методов оптимальной фильтрации, основанных на согласовании импульсной характеристики тракта регистрации с формой принимаемого сигнала и позволяющих достичь максимально возможного отношения сигнал/шум. Однако экспертный анализ показал нецелесообразность использования строго оптимальных фильтров в разрабатываемых для комплекса РК алгоритмах ввиду большой погрешности априорной информации о конкретных параметрах

сигнала. Поэтому для практической реализации алгоритмов обработки сигнала для комплекса РК целесообразным считается применение так называемого «квазиоптимального фильтра» — интегратора [8], характерное время интегрирования которого равно так называемой эффективной длительности сигнала t_e . Используемый «квазиоптимальный фильтр» фактически обладает импульсной характеристикой, имеющей форму прямоугольного импульса длительностью t_e .

Аналитическое выражение, описывающее форму сигнала на выходе счетного детектора от подвижного источника ИИ, выводится из простых геометрических соотношений, основанных на известной зависимости интенсивности излучения от расстояния [9]. Исходя из предположения о равномерном прямолинейном движении источника ИИ по линии, параллельной плоскости чувствительной поверхности плоского детектора, форму сигнала, регистрируемого детектором, можно представить выражением

$$a(t) = \frac{a_0}{\sqrt{(1 + (t \cdot v_0 / r_0)^2)^3}} = \frac{a_0}{\sqrt{(1 + x^2(t))^3}}, \quad (1.7)$$

где v_0 — относительная скорость перемещения источника ИИ и комплекса;

r_0 — расстояние между линией движения источника ИИ и плоскостью, чувствительной к поверхности детектора (детекторов);

a_0 — скорость счета при $t = 0$;

$x(t) = t \cdot v_0 / r_0$ — безразмерный параметр движения, введенный для удобства дальнейшего анализа.

Полученное выражение (1.7) позволяет, используя известные математические приемы [6, 8, 9], решить задачу оптимизации величины эффективной длительности сигнала t_e , приводящей к соотношению:

$$(t_e)_{optim} = 2r_0/v_0. \quad (1.8)$$

Алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью неподвижного комплекса РК

Внешне (т. е. для оператора) алгоритм обнаружения подвижного источника похож на описанный выше алгоритм обнаружения неподвижного источника ИИ. Однако в описываемом случае главной особенностью процедуры обработки регистрируемого сигнала, осуществляемой средствами программного обеспечения, является применение так называемого «скользящего по оси времени интеграла». Последнее означает, что, начиная с команды «Старт», вычисляется среднее значение $n_j(t)$ по временному окну t_e ; далее с тактом Δt (чаще всего устанавливают $\Delta t = 1$ с) это окно интегрирования сдвигается и снова вычисляется $n_j(t)$ по формуле

$$\bar{n} = \frac{\int_0^{t_e} n(t) dt}{t_e}, \quad (1.9)$$

и т. д. вплоть до появления команды «Стоп».

Собственно алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью неподвижного комплекса РК сводится к следующей последовательности операций.

A1. Исходные установки и операции.

После включения и тестирования аппаратуры оператор вводит исходные параметры движения объекта контроля: расстояние r_o , ожидаемую скорость v_o , параметры обнаружения ($P_{\text{дт}}$, критерий обнаружения Неймана-Пирсона), если требуется — служебную информацию (в виде комментариев) об объекте и об условиях контроля. В режиме ожидания объекта контроля осуществляются непрерывные измерения фона. Результаты измерения среднего значения скорости счета фона \bar{b} (среднего за последние заданные интервалы $t_b = 5\text{--}15$ мин) индицируются на дисплее.

А2. По сигналу «Старт» измерения фона прекращаются, в базе данных фиксируется значение \bar{b} , усредненное по измерениям за последний интервал t_b до команды «Старт».

А3. Регистрируются текущие значения скорости счета аддитивной смеси предполагаемого сигнала и фона $n(t) = a(t) + b(t)$ с дискретом Δt .

А4. По истечении времени t_e проводятся вычисления средней скорости счета \bar{n} за время t_e по формуле (1.9).

А5. Вычисляется значение статистики η_1 по основной формуле (1.2), причем вместо времени наблюдения объекта t_n в выражение (1.2) подставляется эффективное время t_e .

А6. По мере движения объекта контроля вычисляются значения средней скорости счета \bar{n}_j по формуле (1.9). Причем всего вычисляется j_{\max} значений; j_{\max} равно целочисленной величине разности $j_{\max} = (t_s - t_e)$. В общем случае j_{\max} может быть довольно большим и зависит от упомянутых выше «оперативных условий» измерения. По полученным \bar{n}_j вычисляются значения статистики η_j с тактом Δt , как в (А6).

А7. По сигналу «Стоп» регистрация $n(t)$ прекращается.

Очевидно, что в рассматриваемом случае длительность интервала наблюдения t_s должна быть несколько больше, чем эффективная длительность сигнала t_e , поскольку оператор должен подать команду «Старт» с так называемым «упреждением», чтобы потери зарегистрированного интегрального уровня движущегося сигнала свести к минимуму. Команду «Стоп» оператор также должен подать несколько позже момента выхода объекта из зоны контроля. Заметим, что упомянутые упреждение и запаздывание могут быть сравнительно большими и зависят от конкретных условий инспекции. В пределе значение t_s может в несколько раз превышать эффективную длительность сигнала t_e (такой случай можно назвать «дежурным режимом», или «режимом ожидания»).

А8. Определяется максимальное значение $(\eta_j)_{\max}$ на интервале t_s и далее для найденного значения $(\eta_j)_{\max}$ по решающему правилу (1.3) принимается одна из гипотез о наличии либо отсутствии источника на объекте контроля.

3. Алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью подвижного комплекса РК

С чисто математической точки зрения случай, при котором комплекс РК движется, а «объект контроля» с источником неподвижен, абсолютно эквивалентен первому случаю с подвижным источником ИИ и неподвижным комплексом. Однако при практической реализации между указанными режимами выявляется существенное различие, обусловленное особенностями флуктуаций фона и подробнее рассмотренное ниже.

Тем не менее, следует отметить, что если характеристики пространственных флуктуаций фона не отличаются от его временных флуктуаций, то для подвижного комплекса РК вполне пригоден и прекрасно работает алгоритм обнаружения, описанный выше для случая неподвижного комплекса РК и движущегося объекта контроля. (Причем в рассматриваемом случае не имеет значения движется ли объект контроля; важно всегда использовать не абсолютную скорость движения комплекса РК, а относительную).

Такие условия соблюдаются, например, на море в случаях использования комплекса РК, смонтированного на вертолете, при проведении радиационного контроля кораблей.

Описанный случай иллюстрируется на рис. 1.2 и комментируется в подрисуночной подписи.

Для рис. 1.2 использованы данные из реального измерения излучения на выходе нейтронного канала, состоящего из 3 детекторов ДИН-02, когда уровень фона составлял $\bar{b} = 19,5 \text{ с}^{-1}$, длительность сигнала $t_e = 32 \text{ с}$, амплитуда сигнала — $a_o = 4,1 \text{ с}^{-1}$,

что соответствует вероятности обнаружения 95,5 %. Очевидно, что по графику $n(t)$ ни факта наличия сигнала, ни положения «центроиды» t_m такого слабого сигнала визуально не видно. Наличие сигнала выявляется только после обработки средствами ПО измеренной $n(t)$ по факту превышения значений статистики $\eta(t)$ порогового уровня q_0 .

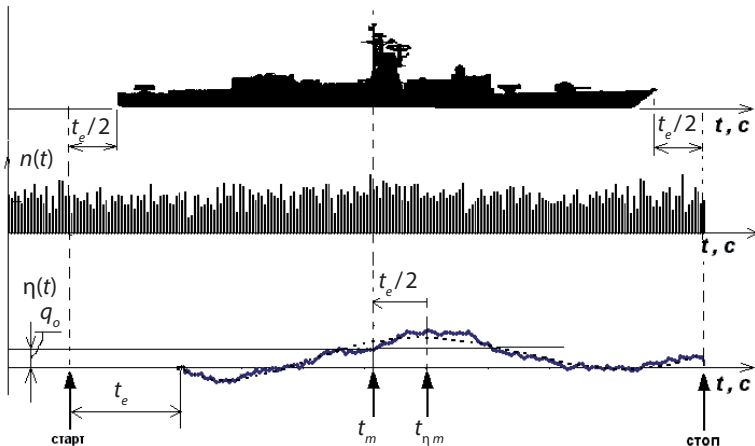


Рис. 1.2. Случай контроля наличия источника ИИ на корабле при помощи вертолетного комплекса РК

О флуктуациях фона и особенностях методики измерения фона из приведенных в пп. 1, 2 соотношений видно, что именно в сравнении характеристик излучения от объекта контроля с фоном (измеренным заранее или после завершения процедуры контроля объекта) и заключается главная специфика используемых в комплексе РК алгоритмов обнаружения источника ИИ. Поэтому для успешного решения задачи обнаружения ключевыми исходными данными являются данные о реальных статистических характеристиках флуктуаций фона.

Безусловно, в идеале хотелось бы, чтобы фон можно было считать эргодическим случайным процессом, т.е. чтобы его статистические характеристики не зависели ни от времени, ни от пространственных изменений точки наблюдения. Однако, к сожалению, как показывает практика, это не так, что заставляет весьма внимательно прорабатывать методики и алгоритмы обнаружения слабых источников, причем, как будет показано ниже, учитывать и зависимость от вида излучения.

3.1. Учет реальных характеристик флуктуаций фона в алгоритмах обнаружения для случаев неподвижного комплекса РК

В [11–15] подробно описаны результаты исследований статистических характеристик флуктуаций нейтронного и гамма-фона. Исследования выполнены как на основе анализа литературных данных [11, 14, 15], так и на основе обработки результатов измерений, полученных авторами с помощью аппаратуры комплексов радиационного контроля «Советник» и «Соратник» [12,13].

Главные выводы из упомянутых исследований, важные для разработки прикладных алгоритмов обнаружения, сводятся к следующим:

1) Согласно обобщениям, приведенным в [11, 14–18], можно утверждать, что вклад нейтронной составляющей космического излучения велик и практически полностью определяет нейтронный фон вблизи поверхности Земли.

Ниже приведем краткие пояснения к выводу 1.

Появление в биосфере нейтронов космического происхождения объясняется процессом взаимодействия космических частиц высоких энергий с ядрами атомов вещества атмосферы и образованием вследствие этого широких атмосферных ливней. Наиболее значительное образование нейтронов космическими лучами происходит на больших высотах. По мере приближения к поверхности Земли число нейтронообразующих

частиц в составе космических лучей заметно убывает, поэтому поток вторичных нейтронов уменьшается до сотых долей процента от потока на максимальной высоте.

Существует предположение о том, что в общем потоке нейтронных частиц присутствует и небольшая доля нейтронов первичного происхождения, приходящих на земную поверхность из области солнечной атмосферы. Однако, несмотря на то, что земной поверхности достигает лишь небольшая часть вторичных нейтронов, образующихся в верхних слоях атмосферы, их интенсивность на уровне моря намного выше той интенсивности, которую имеют нейтроны, возникающие в земной коре. Поэтому на поверхности Земли в нейтронном излучении преобладают вторичные нейтроны космических лучей. Интегральная интенсивность нейтронов космического происхождения на уровне моря соответствует примерно $230 \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{сутки})$, а поток нейтронов земного происхождения составляет от этой величины незначительную долю — от 5 до 20 % [18].

2) Нейтронный фон вблизи поверхности Земли в более чем 99 % случаев достаточно стабилен. Это подтверждают как данные непрерывного мониторинга нейтронного фона Института физики Земли [19], так и наши многочисленные длительные наблюдения.

Возможны, хотя и чрезвычайно редкие (реже, чем 1 раз в 2–4 года), но «гигантские», т.е. более чем двух- и более чем 10-кратные всплески интенсивности нейтронного фона [11, 18, 19]. Как правило, они сильно коррелируют с магнитными бурями [11] и потому могут прогнозироваться заранее.

3) Случайный поток импульсов на выходе детекторов (обусловленных фоновым как нейтронным, так и гамма-излучением) очень хорошо согласуется с математической моделью случайного пуассоновского потока. Особенно близки к теоретически ожидаемым статистические характеристики нейтронного фона (если не учитывать упомянутые в п. 2 редкие «всплески»).

4) Несколько иной результат (по сравнению с нейтронным фоном) в наших исследованиях [12, 13] получен по гамма-фону.

Главные особенности флуктуаций гамма-фона таковы.

Даже в течение сравнительно небольших промежутков времени наблюдения (порядка 1–2 часов и менее) СКО значений скорости счета гамма-фона превышает теоретическое значение, как правило, в 1,3–1,6 раза (доходит изредка до 2,0). Условно эти флуктуации гамма-фона назовем «кратковременными». Существенны суточные изменения уровня (среднего значения) фона. Однако такие суточные флуктуации зависят от региона, в котором проводятся измерения, времени года и других факторов. Чаще всего суточные флуктуации обусловлены резкими изменениями температуры от дня к ночи (что связано, по-видимому, с эманациями радона и аналогичными причинами [14]).

5) Некоторые практические рекомендации при работе в режиме «Обнаружение» при неподвижном комплексе РК.

Обычно при использовании алгоритмов, описанных в пп. 1 и 2, для измерений фона придерживаются следующих правил, выработанных на основе накопленного опыта решения задач обнаружения:

- Если нет жестких ограничений во времени, то измерения фона следует проводить перед каждым сеансом контроля объекта (или ограниченной группы объектов). При этом интервал времени между окончанием процедуры измерения фона и началом контрольного измерения излучения от объекта должен быть минимальным. Это позволяет существенно снизить вероятности ошибок при решении задачи обнаружения.
- Если в силу каких-либо ограничений (требование оперативности, особенности условий контроля и т.п.) измерение фона невозможно провести перед контролем

объекта, то можно провести такой замер в более удобное время, после контроля объекта.

В последнем случае решение задачи обнаружения выполняется путем повторной обработки результата измерения излучения от объекта контроля с новым измеренным значением фона (т.е. повторной обработки результата, извлекаемого из базы данных). В прикладном ПО предусмотрена возможность такой повторной обработки.

Исследования статистических характеристик флуктуаций фона позволили доработать прикладное ПО с целью обеспечения возможности корректировки порогов обнаружения, используемых в алгоритмах. Как показали исследования, наиболее целесообразно и в то же время наиболее просто такую корректировку осуществлять введением дополнительного «коэффициента коррекции параметра флуктуаций фона» $K_f \geq 1$; на указанный коэффициент K_f в ПО умножается значение теоретически вычисленного порога q_0 (см. п. 1).

Анализ результатов исследований фона показывает, что по умолчанию рекомендуется устанавливать в «ПО обнаружителя» для нейтронного канала значение $K_f = 1,0-1,3$ (как правило, не более 1,3); для гамма-канала значение $K_f > 1,5-2,0$ в зависимости от региона, где проводятся измерения. Более точное значение выявляется в результате набора и обработки статистики измерений фона в конкретных условиях. Еще раз следует подчеркнуть, что здесь речь идет о случаях проведения РК средствами неподвижного комплекса.

3.2. Учет реальных характеристик флуктуаций фона в алгоритмах обнаружения для случаев подвижного комплекса

Наши исследования [11–13] показывают, что уровень нейтронного фона практически не испытывает сколько-нибудь существенных дополнительных флуктуаций в случаях проведения РК средствами подвижного комплекса. Поэтому для нейтронного канала пригодны алгоритмы обнаружения, описан-

ные в п. 2; как показывает практика использования подвижных комплексов РК, такие алгоритмы для нейтронного канала «работают» почти строго в соответствии с теорией.

Совершенно иная картина наблюдается для гамма-фона в случаях подвижного автомобильного комплекса РК. И литературные данные, и наши многочисленные исследования [12, 13] свидетельствуют о весьма сильной зависимости уровня гамма-фона от конкретной координаты точки, в которой выполняется измерение. Указанный фактор, как правило, весьма значим в регионах, в которых имеются выходы скальных пород на поверхность. Весьма значительные и резкие изменения уровня гамма-фона наблюдаются также при перемещении по дорогам, для строительства которых используют строительные материалы, сильно различающиеся по уровню радиационной загрязненности. По нашим данным, зачастую в «подушке» дорог используется щебенка, дающая 2–4-кратное превышение уровня фонового излучения по отношению к среднему фону «вне дороги» [12, 13, 16]. (Такой повышенный уровень излучения стройматериалов для строительства дорог допускается существующими стандартами, в частности, ОСПОРБ-99). Аналогично может регистрироваться повышенное излучение от различных дорожных сооружений (мостов, дорожных развязок, эстакад, столбов и т. п.).

Один из наиболее ярких примеров сильных флуктуаций гамма-фона, обусловленных придорожными сооружениями и эстакадами, показан на рис. 1.3.

Однако накопленный практический опыт проведения радиационного контроля показывает, что весьма нередки случаи, когда при движении комплекса РК по дороге гамма-фон не претерпевает резких скачков, а меняется достаточно плавно, примерно так, как изображено на рис. 1.4. При использовании вертолетного комплекса РК также, как правило, наблюдаются аналогичные «плавные» изменения гамма-фона (см. рис. 1.5).

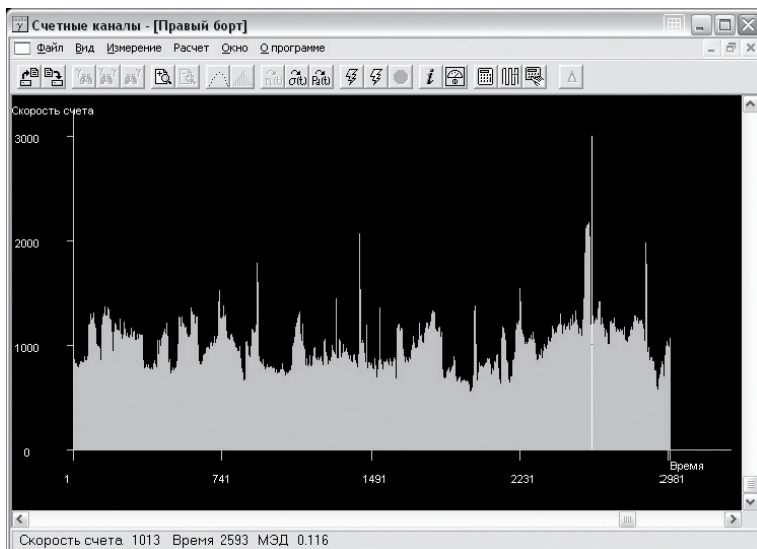


Рис. 1.3. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом комплекса РКГ при перемещении по московской кольцевой автомобильной дороге

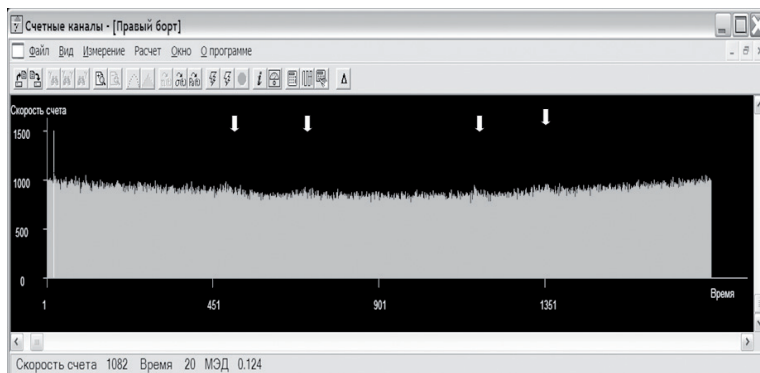


Рис. 1.4. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом комплекса РКГ в условиях медленно меняющегося уровня фона (участок вдоль лесной дороги)

Стрелками показаны сигналы, обнаруженные средствами ПО в режиме «Поиск» (алгоритмом «Поиск», описанным ниже в п. 4); длительность обнаруженных сигналов составляет соответственно 50; 60; 15; 45 с.

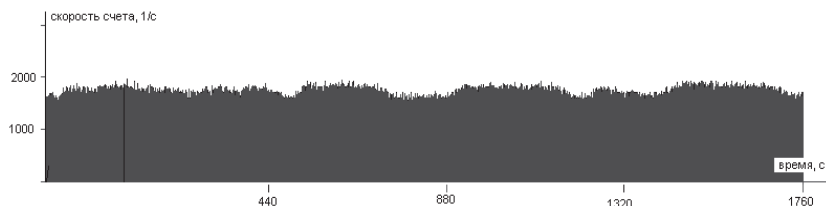


Рис. 1.5. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом вертолетного комплекса «Соратник-03» над гладкой безлесной площадью размером $1 \times 1,5$ км² (сеанс измерения № 552 от 15.12.2005)

Из описанных характерных особенностей гамма-фона следует, что алгоритмы обнаружения по [1], в основу которых положен метод предварительного измерения среднего уровня фона (алгоритмы, описанные в п. 4), для гамма-каналов и в случае подвижного комплекса РК (не важно — автомобильного или вертолетного), как правило, оказываются совершенно непригодными. Сказанное относится и к случаям плавного изменения гамма-фона, показанным в качестве примера на рис. 1.4 и 1.5. Аналогичные ситуации «плавного изменения гамма-фона» выявились при испытаниях комплекса «Соратник-01», когда алгоритм обнаружения, описанный в п. 2, не «сработал».

Таким образом, выявилась актуальная необходимость разработки принципиально новых алгоритмов обнаружения.

В п. 4 ниже описан алгоритм поиска и обнаружения слабых источников ИИ, запатентованный авторами работы [2], в котором предусмотрена «адаптация» обнаружителя к описанным

условиям больших флуктуаций гамма-фона при движении комплекса РК. Подчеркнем, что новый алгоритм, названный для краткости в тексте ниже «Поиск», специально разрабатывался так, чтобы не требовалось предварительного (до начала процедуры поиска) измерения фона [2].

4. Алгоритм «Поиск»

4.1. Формулировка постановки задачи

В отличие от задач, описанных в пп. 1 и 2, в задаче «Поиск» фон не измеряется заранее, до начала контроля объекта (территории), и потому уровень фона заранее не известен. Поскольку априори считаем процедуру поиска довольно длительной, и заранее известно, что имеет место значительное изменение («уплывание») среднего уровня фона (п. 3), то конкретные значения среднего уровня фона должны определяться оперативно, в процессе непрерывной обработки результатов измерений при движении комплекса РК по маршруту поиска в режиме «on-line».

4.2. Операции, выполняемые перед выездом на маршрут поиска:

- подготовка карт территории поиска;
- разработка маршрута поиска (начальная и конечная точки маршрута, проработка тактики поиска (серпантинном или иначе);
- составление плана-задания на выполнение работ по поиску источников ИИ.

4.3. Описание алгоритма «Поиск»

Разработанный авторами описываемой разработки алгоритм «Поиск» [2] сводится к выполнению следующей последовательности операций.

4.3.1. Первичные операции

Сразу после выезда на маршрут поиска:

- Нажимается кнопка «Старт».
- По сигналу «Старт» начинается измерение непрерывной аддитивной смеси «сигнал плюс фон» $n(t)$ (ниже используем термин «реализация $n(t)$ »).
- Синхронно с измерениями начинается обработка реализации $n(t)$.

4.3.2. Общая обработка реализации $n(t)$ средствами ПО

Средствами ПО сначала из реализации $n(t)$ выделяется подынтервал № 1. Длительность подынтервала (времени экспозиции), как показывает анализ, должна быть $t_{\text{эксп}} \geq 4t_e$. Обычно значение $t_{\text{эксп}}$ назначают не более $10t_e$. Опыт работы показывает, что оптимальным для автомобильного комплекса является соотношение $t_{\text{эксп}} = (5-6) \cdot t_e$, где $t_e = 2r_o/v_o$. При $t_e < 8$ с используется ограничение $t_{\text{эксп}} = 50$ с; при $t_e > 200$ с используется ограничение $t_{\text{эксп}} = 1000$ с.

Обработку выделенного подынтервала реализации $n_1(t)$ состоит из трех этапов.

4.3.3. Первый этап обработки реализации $n_1(t)$

Результат измерений, полученных на первом подынтервале $n_1(t)$, пропускается через фильтр-сглаживатель типа «скользящее временное окно» с временем усреднения t_e (точно такая же обработка, как и описанная в п. 2).

Эта операция необходима для введения в блок «Аппроксимация» первичных значений параметров обрабатываемой реализации (см. выражение (1.10) ниже).

Алгоритм определения этих первичных значений таков: после фильтрации «скользящим средним» выявятся участки с максимумами («всплесками вверх»). Из них берется самый максимальный по абсолютной величине всплеск, ему и при-

сваивается значение t_{m1} для первой итерации. Средний уровень фона для первой итерации \bar{b}_1^* берется равным средней скорости счета по всей реализации $n_1(t)$. А амплитуда сигнала для первой итерации берется равной (или близкой) к порогу обнаружения с вероятностью 50 % ($a_{o1}^* = a_{\min}$). В свою очередь пороговое a_{\min} может быть вычислено по формуле (1.5), куда подставляется $q_p = 3,2$.

4.3.4. Второй этап обработки реализации $n_1(t)$

Результат измерений $n_1(t)$ пропускается через блок «Аппроксимация» (аппроксимировать заданным выражением)

$$n_1(t) = \bar{b}_1 + k_{b1}t + a_1(t), \quad (1.10)$$

где $a_1(t)$ описывается формулой (1.7).

Предварительно в блок «Аппроксимация» вводятся первичные значения \bar{b}_1^* , a_{o1}^* , t_{m1} , полученные на первом этапе обработки (при этом $k_{b1} = 0$).

После решения задачи «Аппроксимация» получаем: фактический (по результатам измерений и обработки) уровень фона \bar{b}_1 для первого подынтервала, амплитуду a_{o1} и уточненное временное положение t_{m1} сигнала.

4.3.5. Третий этап обработки реализации $n_1(t)$

Решается задача обнаружения квазинепо движного источника описанным в п. 1 методом. Полученная достаточная статистика η сравнивается с порогом q_o . Очевидно, что в большинстве случаев $\eta < q_o$, т. е. η ниже порога. Переходят к следующим процедурам обработки.

Если $\eta > q_o$, то формируется информация «ЕСТЬ», т. е. «Источник обнаружен». Дальнейшие действия должны регламентироваться планом-заданием. На третьем этапе важно правильно установить порог обнаружения q_o .

4.3.6. Дальнейшие измерения и обработка

Параллельно с процедурой обработки реализации $n_1(t)$ для подынтервала № 1 продолжается измерение (накопление) аналогичной реализации $n_2(t)$ для подынтервала № 2, длительность которого так же, как и первого, равна $t_{\text{эксп}}$.

По окончании подынтервала № 2 реализация $n_2(t)$ подвергается обработке, точно такой же, как описано в пп. 4.3.3.

Уместно сделать важное замечание о перекрытии соседних подынтервалов. Каждый последующий $(i+1)$ -й подынтервал накладывается на предыдущий i -й подынтервал на величину $2t_e$. Таковое перекрытие необходимо для обработки в случаях, когда сигнал попадает на край подынтервала.

Далее циклически повторяются действия по пп. 4.3.3 для подынтервалов №№ 3, 4, 5 и т.д., вплоть до завершения маршрута, указанного в плане-задании, если иного алгоритма не предписано.

4.3.7. Завершающие операции алгоритма «Поиск»

После нажатия кнопки «Стоп» в конечной точке маршрута программа фиксирует конкретное фактическое полное время поиска (серии измерений) $t_{\text{сер}}$.

Очевидно, что программа должна выполнить полный перерасчет всей зарегистрированной реализации $n_1(t)$ с новым значением $t_{\text{сер}}$.

По поводу «устойчивости» описанного алгоритма «Поиск» к ложным тревогам необходимо добавить следующее.

По соотношению амплитуд сигналов, обнаруженных в процессе контрольного объезда по маршруту, оператор может судить о том, насколько вероятна ошибка обнаружения и принимать оправданное решение по вопросу повторных проездов возле точек с предполагаемым источником. Если факт обнаружения в упомянутых точках при повторном проезде подтвер-

ждается, то считается, что вероятность обнаружения составляет не менее 99 %. Далее предпринимаются действия в соответствии с общей тактикой поиска — обезвреживание источников, измерения с целью идентификации радионуклидного состава, изучение предыстории точки загрязнения (или происхождение найденного источника) и т. п.

Библиографический список к лабораторной работе № 1

1. Пат. 2140660 Российская Федерация, МПК G01T 1/167. Способ обнаружения слабых потоков ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Кружалов А. В., Шеин А. С., Шульгин Б. В., Шульгин Д. Б. — № 98102583; заявл. 10.02.1998; опубл. 27.10.1999, Бюл. № 17.
2. Пат. 2242024 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Ивановских К. В., Лазарев Ю. Г., Петров В. Л., Шеин А. С., Шульгин Б. В. — № 2003119905; заявл. 30.06.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 3.
3. Пат. 2456638 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Шеин А. С., Викторов Л. В., Кунцевич Г. А., Петров В. Л., Шульгин Б. В. Заявл. 29.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.
4. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1 / Г. Ван Трис. Москва : Сов. Радио, 1972. 744 с.
5. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. Москва : Радио и связь, 1982. 624 с.
6. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов [и др.]. Москва : Радио и связь, 1984. 440 с.
7. Закс Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс. Москва : Мир, 1975. 776 с.
8. Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульс-

- ных сигналов / Ю.С. Лезин. М. : Сов. радио, 1963. 278 с.
9. Викторов Л. В. Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Л. В. Викторов, А.С. Шеин, В.Л. Петров // Проблемы спектрометрии и спектроскопии: межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург : УГТУ, 2008. Вып. 25. С. 146–160.
 10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. Москва : Наука, 1982. 624 с.
 11. Викторов Л. В. Вариации нейтронного поля Земли / Л. В. Викторов, Ю.А. Могильникова // Проблемы спектрометрии и спектроскопии: межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург: УГТУ, 2000. Вып. С. 95.
 12. Викторов Л. В. Исследования статистических характеристик флуктуаций гамма- и нейтронного фона / Л. В. Викторов, В.С. Андреев, В.Л. Петров // Проблемы спектрометрии и спектроскопии : межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург : УГТУ, 2002. Вып. 10. С. 10.
 13. Статистические характеристики флуктуаций гамма- и нейтронного фона / В.С. Андреев, Л. В. Викторов, В.Л. Петров, А.С. Шеин // Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии: тезисы докладов на VI международном совещании. Москва : ВНИИФТРИ, 2002. С. 32.
 14. Перцов Л. А. Природная радиоактивность биосферы / Л. А. Перцов. Москва : Атомиздат, 1964. 316 с.
 15. Кузин А. М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли / А. М. Кузин. Москва : Наука, 1991. 117 с.
 16. Моисеев А. А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене / А. А. Моисеев, В. И. Иванов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 252 с.
 17. Источники и действие ионизирующей радиации. Доклад

- НКДАР ООН по действию атомной радиации за 1977 г. на Генеральной Ассамблее с приложениями. В 3 т. ООН, Нью-Йорк, 1978. Т. 1.
18. Дорман Л. И. Современное состояние проблемы вариаций космических лучей / Л. И. Дорман // Элементарные частицы и космические лучи: сборник статей / под ред. А. Рамакришнана. Москва : Мир, 1965.
 19. Сайт станции космического излучения ИЗМИРАН (Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/main.htm>. Загл. с экрана.

Лабораторная работа № 2

Измерения основных характеристик счетчиков нейтронов ПД-631 М

Цель работы:

1. Изучение физических принципов работы счетчика нейтронов ПД-631 М.
2. Ознакомление с установкой для измерения основных параметров счетчика нейтронов ПД-631 М.
3. Выполнение измерений основных параметров счетчика нейтронов ПД-631 М.

Нейтронные каналы комплексов «Советник» и «Соратник» построены на нейтронных детекторах серии «ДИН». Эти детекторы имеют активную поверхность $0,7 \text{ м}^2$ и предназначены для измерения потока нейтронов на уровне фона ($10\text{--}30 \text{ н/м}^2$). Для получения высокой эффективности регистрации нейтронов каждый детектор состоит из 23 счетчиков нейтронов ПД-631 М, которые являются газовыми пропорциональными детекторами на ^3He .

1. Основные положения

Газонаполненный пропорциональный детектор относится к ионизационным детекторам, работающим в режиме газового усиления. При прохождении через газ заряженная частица, теряя энергию E , образует в треке в среднем N_0 электронных пар (первичная ионизация). Величина $N_0 = E/\omega$, где ω — средняя энергия, затрачиваемая на образование одной пары. Электроны и ионы под действием внешнего электрического

поля дрейфуют через газ. Если напряженность электрического поля в детекторе достаточно велика, то электроны набирают на длине свободного пробега энергию, достаточную для ионизации молекул или атомов газа (вторичная ионизация). Если на пути в 1 см по направлению электрического поля электроны испытают a соударений, приводящих к ионизации, то количество пар ионов, образованных N электронами в слое dx , будет

$$dN = Na(x)dx,$$

где a — коэффициент ударной ионизации. Тогда количество пар ионов во всей лавине будет

$$N = N_0 \left(\int_{x_1}^{x_2} a(x') dx' \right), \quad (2.1)$$

где x_1 — координата места первичной ионизации; x_2 — координата конца лавины. Увеличение числа пар ионов в результате ударной ионизации характеризуется коэффициентом газового усиления m , равным отношению полного числа пар ионов N в лавине к числу пар ионов N_0 : $m = N/N_0$.

Из формулы (2.1) видно, что количество образованных в лавине пар ионов определяется не только значениями N_0 и a , но и местом первичной ионизации. Следовательно, заряд Q , индуцированный во внешнюю цепь ионизационного детектора с газовым усилением и пропорциональный числу дрейфующих зарядов $Q \sim N$, также зависит от координаты трека частицы. Очевидно, что заряд Q , индуцированный во внешнюю цепь, будет пропорционален потерянной частицей энергии E только в том случае, если каждый первичный электрон независимо от места его образования создаст в процессе усиления в среднем одно и то же количество пар ионов. Такое условие выполняется в детекторах цилиндрической формы, в которых диаметр цилиндра (катода) много больше диаме-

тра анода — металлической нити, натянутой по оси цилиндра (рис. 2.1).

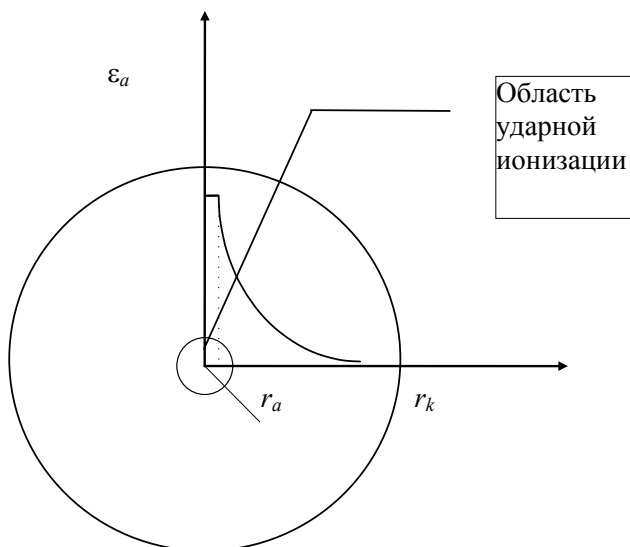


Рис. 2.1. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния до центральной оси в детекторе цилиндрической формы

Действительно, из-за резкой неоднородности электрического поля ϵ вдоль направления r ($\epsilon = U_0 / (r \ln(r_k / r_a))$), где U_0 — разность потенциалов на электродах; r_k и r_a — радиусы катода и анода соответственно, коэффициент ударной ионизации a отличается от нуля лишь в очень малом объеме, прилегающем к нити. Иначе говоря, в цилиндрических детекторах для всех первичных электронов условия образования лавин одинаковы и не зависят от места прохождения частицы. Для достаточно больших значений коэффициента газового усиления m

индуцированным зарядом от движения электронов и ионов до области ударной ионизации можно пренебречь и считать, что заряд Q во внешней цепи определяется только числом электронов и ионов, дрейфующих из области ударной ионизации, и пропорционален энергии частиц: $Q \sim mN_0 = mE/\omega$. Именно поэтому детекторы с газовым усилением, имеющие цилиндрическую форму, называют пропорциональными счетчиками. Так как развитие электронно-ионных лавин идет у анода на расстояниях, равных нескольким диаметрам нити, путь дрейфа электронов до анода невелик, поэтому основной вклад в заряд дает ток, возникающий во внешней цепи от дрейфа положительных ионов к катоду.

Заряд Q во внешней цепи пропорционального счетчика, а также его временные характеристики зависят от сопротивления нагрузки R и эквивалентной емкости C (суммарная емкость счетчика и подключенных к нему цепей).

При выборе $RC \gg T^+$ — времени дрейфа ионов из области ударной ионизации — максимальный заряд во внешней цепи равен $Q_{\text{макс}} = mN_0$. Однако необходимости выбирать $RC \gg T^+$ нет, так как основной вклад в индуцированный заряд Q дает движение ионов в сильном поле вблизи анода. Оказывается, что при значениях RC порядка нескольких микросекунд во внешнюю цепь индуцируется около 50 % максимального значения заряда. При этом пропорциональные свойства счетчика сохраняются, а его временное разрешение существенно улучшается. С другой стороны, RC должно быть, по крайней мере, на порядок больше T^+ — времени дрейфа электронов первичной ионизации от катода к аноду, чтобы не нарушались пропорциональные свойства счетчика. Следует отметить, что на практике формирование импульсов с детектора достигается не путем изменения R , а подбором полосы пропускания усилителя.

Ударная ионизация является основным, но не единственным фактором, определяющим развитие лавин в детекторе.

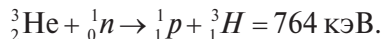
При дрейфе электронов в сильных электрических полях наряду с процессом ударной ионизации имеет место возбуждение молекул или атомов газа. Возвращаясь в основное состояние, молекулы испускают фотоны, которые могут вызвать фотоэффект на катоде счетчика. Фотоэлектрон, вышедший с поверхности катода, создает в области анода дополнительную ионизацию. Кроме того, если потенциальная энергия положительного иона при подходе к катоду из области ударной ионизации превышает удвоенную работу выхода электрона с поверхности катода, то может появиться еще один свободный электрон. Этот электрон на пути к аноду в свою очередь образует электронно-ионную лавину. Вероятность подобных процессов в пропорциональных детекторах невелика.

Коэффициент газового усиления m зависит от напряжения U_0 , приложенного к электродам пропорционального детектора, причем так, что незначительная нестабильность (дрейф) источника питания может привести к существенным изменениям коэффициента m . Обычно m определяют экспериментально методом сравнения заряда газонаполненного пропорционального детектора $Q_{\text{ид}}$ и того же детектора при работе в режиме ионизационной камеры $Q_{\text{ик}}$ в отсутствие газового усиления. В этом случае $m = Q_{\text{пл}}/Q_{\text{ик}}$.

Газоразрядные пропорциональные детекторы нашли широкое применение при регистрации различных видов излучений и, в частности, нейтронов. В связи с тем, что нейтроны не могут производить непосредственную ионизацию атомов, их детектирование осуществляется либо путем образования ядер отдачи в процессе упругого рассеяния (для быстрых нейтронов), либо по ядерным реакциям, продуктами которых являются заряженные частицы (для медленных и тепловых нейтронов). Ниже рассматривается второй метод.

В экспериментах по регистрации нейтронов часто используется счетчик, наполненный газом ^3He (гелиевый счетчик),

в котором под действием нейтронов идет экзоэнергетическая реакция



Энергия 764 кэВ, выделяемая в этой реакции, вместе с энергией нейтрона передается протону и тритию и распределяется между ними обратно пропорционально их массам. Продукты реакции разлетаются в противоположные стороны и ионизируют газ в рабочем объеме детектора, вследствие чего на его выходе индуцируется электрический сигнал.

Принципиально гелиевые счетчики могут использоваться для регистрации нейтронов любых энергий, однако из-за больших сечений реакции ${}^3\text{He} (n, p){}^3\text{H}$ для тепловых и медленных нейтронов (5330 барн) максимальная эффективность регистрации достигается именно в этой области энергий, что и определяет основное применение таких детекторов.

В зависимости от типа гелиевого счетчика они заполняются газовой смесью из ${}^3\text{He}$, Ar и ряда других компонентов, при этом содержание ${}^3\text{He}$ может колебаться в достаточно широких пределах вплоть до 96 %. Добавки инертных газов служат для улучшения выходных параметров счетчика.

В том случае, когда оба продукта реакции полностью теряют свою энергию на ионизацию в рабочем объеме детектора, амплитудное распределение импульсов на выходе гелиевого счетчика для моноэнергетических нейтронов (функция отклика) имеет вид изолированного пика (пик полного поглощения). Если пробеги продуктов реакции не укладываются внутри рабочего объема и продукты реакции попадают в катод (стеночный эффект), то в амплитудном распределении появляется низкоэнергетический «хвост», соответствующий частицам, потерявшим в счетчике только часть своей энергии. Типичный

спектр продуктов реакции для тепловых нейтронов представлен на рис. 2.2.

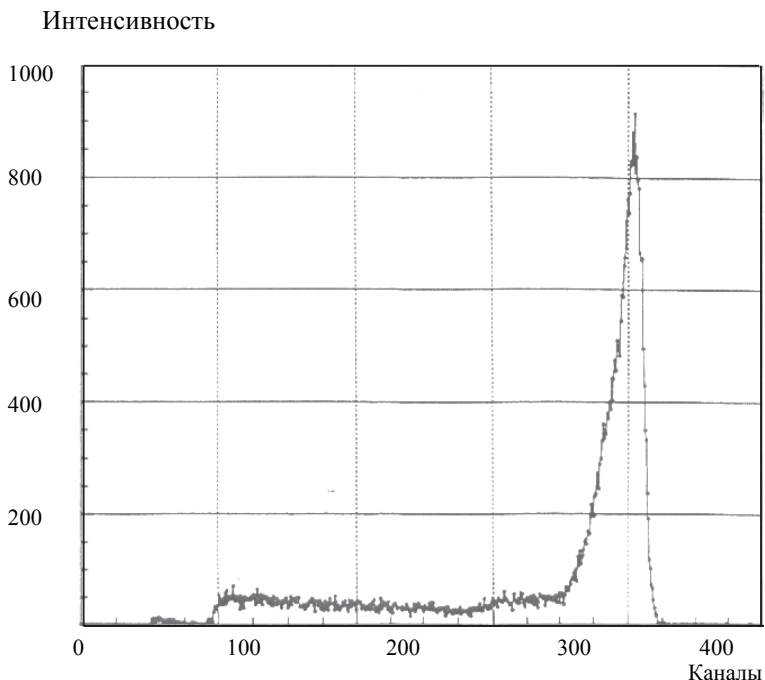


Рис. 2.2. Типичный спектр продуктов реакции, зарегистрированных пропорциональным гелиевым счетчиком

2. Лабораторная установка

Установка для измерения характеристик детекторов (см. рис. 2.3) состоит из источника быстрых нейтронов (1), замедлителя (2), детектора (3), предусилителя (4), спектрометрического усилителя (5), платы АЦП, встроенной в компьютер (6), высоковольтного источника питания (7) и осциллографа (8) для наблюдения и измерения сигналов.

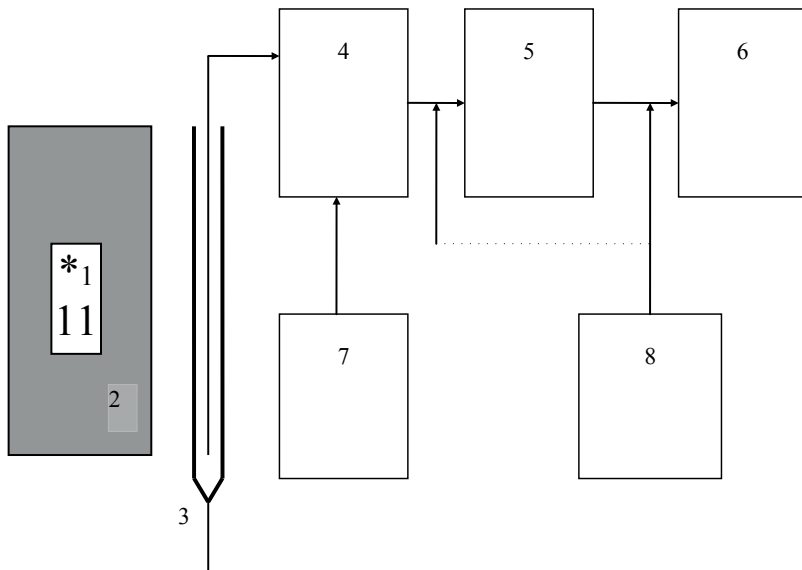


Рис. 2.3. Функциональная схема установки для регистрации медленных нейтронов:

1 — источник быстрых нейтронов; 2 — замедлитель; 3 — счетчик;
4 — предусилитель; 5 — усилитель; 6 — компьютер со встроенной платой АЦП; 7 — источник питания счетчика; 8 — осциллограф

В работе используется закрытый плутоний — бериллиевый источник быстрых нейтронов типа ИБН-28 с потоком быстрых нейтронов в телесный угол 4π — 10^4 с⁻¹. Герметическая капсула источника выполнена из коррозионно-стойкой нержавеющей стали. Типовой энергетический спектр нейтронов таких источников с максимальной энергией 12 МэВ представлен на рис. 2.4. В качестве замедлителя быстрых нейтронов используются стандартные водородосодержащие блоки из полиэтилена.

Выход
нейтронов,
отн. ед.

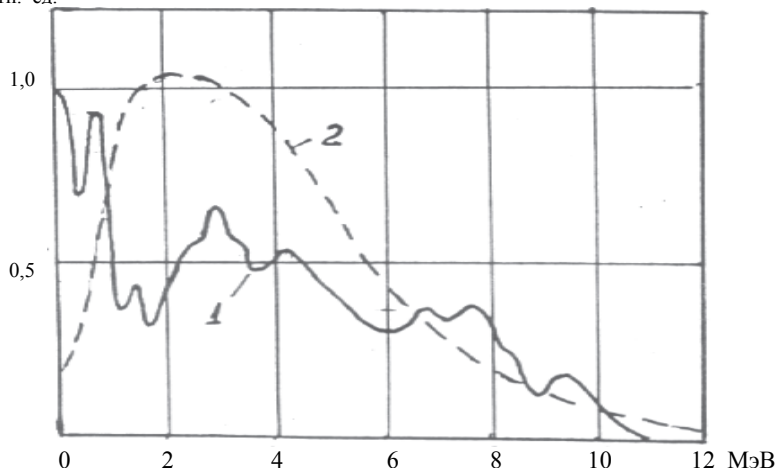


Рис. 2.4. Спектры нейтронных источников:

1 — Pu- α -Be, 2 — Cf-252

Для регистрации тепловых нейтронов в работе используются два газонаполненных пропорциональных детектора: гелиевый счетчик ПД631М. Он представляет из себя цилиндрическую трубку из нержавеющей стали диаметром 31 мм и длиной 103 см, внутри которой на стеклянных изоляторах натянута вольфрамовая нить диаметром 0,05 мм. Детектор ПД631М заполнен газовой смесью из ^3He высокой степени очистки (99,99 %) с незначительными добавками Ar и Ne под давлением 4 атм. Рабочее напряжение питания $U = 1750$ В. Схема включения детекторов позволяет сформировать на нагрузке отрицательный электрический сигнал с максимальной амплитудой 100 мВ и временем нарастания порядка 5 мкс, который после усиления и формирования ($T_{\phi} = 10$ мкс) подается на плату спектрометрического АЦП, встроенную в компьютер. Про-

граммное обеспечение работы АЦП и обработки накопленных данных осуществляется с помощью пакета ATSpec2.702.

Внимание!

При работе с источником необходимо соблюдать требования радиационной безопасности. Источник нейтронов должен постоянно храниться в защитном контейнере, а выниматься из него и устанавливаться около детектора только на период измерений. При измерениях соблюдать защиту расстоянием и временем!

3. Порядок выполнения работы

Перед началом работы проверить подключение блоков электронной аппаратуры в соответствии с функциональной схемой установки. Подключить гелиевый счетчик. Включить питание всех приборов и компьютера и дать им прогреться в течение 10 минут. Вынуть источник нейтронов из контейнера и установить его в полиэтиленовый замедлитель возле детектора. При указанном преподавателем напряжении питания на счетчике подобрать усиление тракта таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдались импульсы от счетчика.

3.1. Измерение параметров сигнала гелиевого счетчика, работающего в режиме газового усиления при паспортном напряжении питания $U = 1750$ В

По осциллографу измерить амплитуду и длительность фронта импульса напряжения после спектрометрического усилителя. Оценить время сбора ионного компонента заряда, сравнить его с длительностью фронта импульса.

3.2. Измерение амплитудного спектра продуктов реакции и его анализ

Запустить программу ATSpec 2/702. Набрать спектр продуктов реакции, задав время измерения из условия получения

в максимуме пика порядка 2000 импульсов. Идентифицировать все участки спектра с точки зрения протекающих в детекторе процессов. Провести калибровку энергетической шкалы спектрометрического тракта по значениям энергий в пике полного поглощения и по левому краю одной из ступенек от стеночного эффекта. По результатам калибровки определить значение энергии, соответствующее левому краю второй ступеньки. Определить относительное и абсолютное энергетическое разрешение измерительного тракта. Вычислить вклад стеночного эффекта как отношение площади ступенек $S_{\text{ст}}$ к общей площади спектра S_0 , выраженное в процентах. По значению коэффициента усиления спектрометрического усилителя и зарядочувствительности предусилителя вычислить заряд на выходе счетчика, соответствующий поглощенной энергии 764 кэВ.

3.3. Измерение коэффициента газового усиления пропорционального счетчика

По осциллографу снять зависимость максимальной амплитуды импульсов после усилителя от напряжения питания в диапазоне напряжений от 1000 до 1800 В. Выделить пропорциональный режим работы счетчика и режим работы ионизационной камеры. По отношению амплитуд при различных режимах работы счетчика определить коэффициент газового усиления и его зависимость от напряжения питания.

3.4. Проведение измерений положения пика полного поглощения для 5 счетчиков

Повторить для 5 счетчиков все измерения, указанные в п. 3.2. Определить по спектрам положение пика полного поглощения (Pi) для каждого счетчика и занести эти значения в таблицу. Вычислить среднее значение Pi и найти относительный разброс Pi для каждого счетчика. Определить максимальное значение относительного разброса Pi .

Содержание отчета

Студенты, проходящие лабораторный практикум по курсу «Системы и методы радиационного контроля», представляют по лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы счетчиков нейтронов ПД-631 М;
- схему и основные особенности работы установки для измерения параметров ПД-631 М;
- результаты измерений и обработки основных параметров ПД-631 М, полученные при выполнении лабораторной работы.

Лабораторная работа № 3

Измерения основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических на установке СПЕКТР 1

Цель работы:

1. Изучение физических принципов работы блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических.
2. Изучение прикладных вопросов выполнения гамма-спектрометрических измерений с использованием упомянутых блоков детектирования и спектрометрической аппаратуры.
3. Ознакомление с метрологическими аспектами проведения измерений основных технических характеристик (ОТХ) блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических.
4. Выполнение измерений ОТХ блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических с оценкой погрешности результатов измерений.

Настоящая лабораторная работа основана на использовании документа «Методика измерений основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических на установке СПЕКТР 1» (МВИ 21–223–15), разработанного на кафедре эксперимен-

тальной физики УрФУ и аттестованного Федеральным государственным унитарным предприятием «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ»). (Свидетельство об аттестации методики измерений № 223.0138/01.00258/2015 от 26.06.2015 г.).

Важно особо подчеркнуть, что разработка и аттестация методики выполнения измерений являлись важнейшими этапами создания метрологического обеспечения производства детекторов гамма-излучения. Безусловно, не менее важным являлись разработка и создание образцовой установки СПЕКТР 1, ее метрологическая аттестация и периодическая проверка органами РосСтандарта.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться с «Руководством по эксплуатации установки для измерений основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных СПЕКТР 1» (РЭ), в котором изложены технические характеристики, устройство и принцип действия, а также правила эксплуатации установки (прилагается файл «РЭ_СПЕКТР1» установки).

Кроме того, студенты должны вспомнить:

- основные термины по сцинтилляционной технике и их физический смысл. Для этого можно воспользоваться словарем терминов «Сцинтилляционные детекторы», изданным в УрФУ [1]//Файл «Сцинтил_Детекторы_Термины2003В» прилагается//;
- основные термины и понятия из метрологии, а также теории вероятностей (в частности, что такое среднее арифметическое значение, медиана, СКО);
- обязательным является также предварительное изучение и соблюдение правил радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующих излучений в соответствии с [2, 3].

Ниже приводится полный текст (копия) методики выполнения измерений МВИ 21–223–15. В соответствии с указанной методикой и выполняется лабораторная работа № 3. В конце, после текста МВИ, изложены требования к отчету по результатам выполнения настоящей лабораторной работы № 3.

**Блоки детектирования гамма-излучения сцинтилляционные
спектрометрические**
**Методика измерений основных технических характеристик
на установке СПЕКТР 1**

МВИ 21–223–15

Дата введения 2015

1. Область применения

Настоящий документ устанавливает методику измерений основных технических характеристик (ОТХ) блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических в соответствии с требованиями ГОСТ 26652 на установке СПЕКТР 1 с использованием прикладной программы LSRM-32, разработанной ГП «ВНИИФТРИ».

К числу измеряемых ОТХ относят:

- эффективность регистрации гамма-излучения;
- относительное амплитудное разрешение.

Методика измерений предназначена для применения в специализированной лаборатории ФГАОУ ВПО УрФУ.

2. Нормативные ссылки

В настоящей методике измерений используются ссылки на следующие документы:

ГОСТ 26652–85 Блоки детектирования сцинтилляционные. Общие технические требования и методы испытаний;

ГОСТ 26874–86 Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров.

3. Требования к показателям точности измерений

Значения относительного среднего квадратического отклонения (СКО) повторяемости, относительного СКО внутрилабораторной прецизионности, границ относительной систематической погрешности и границ относительной погрешности измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$ приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Определяемая ОТХ, единицы измерений	Диапазон измерений	Относительное СКО повторяемости, $\sigma_r, \%$	Относительное СКО внутрилабораторной прецизионности, $\sigma_{R_L}, \%$	Границы относительной систематической погрешности при $P = 0,95$, $\pm\delta_{cL}, \%$	Границы относительной погрешности при $P = 0,95$, $\pm\delta_L, \%$
Эффективность регистрации гамма-излучения, см ²	От 0,2 до 80	3,4	4,1	0,7	8,0
Относительное амплитудное разрешение, %	От 5,9 до 11	1,2	1,5	0,6	3,0

4. Метод измерений

Для измерения ОТХ сцинтилляционных блоков детектирования на установке СПЕКТР 1 применяется метод замещения, т.е. измеряются основные параметры спектров энергий гамма-излучения от образцовых спектрометрических источни-

ков гамма-излучения (ОСГИ) с помощью сцинтилляционного блока детектирования со встроенным источником высокого напряжения (БДС). Для получения значений ОТХ испытуемых блоков детектирования (БД_и) последний подключают ко входу установки СПЕКТР 1 взамен БДС и уже с помощью БД_и проводят аналогичные измерения спектров гамма-излучения.

Эффективность регистрации ионизирующего излучения детектором определяется как отношение числа электрических импульсов, зарегистрированных на выходе детектора в единицу времени, к числу частиц, попавших в детектор за то же время.

Метод измерений относительного амплитудного разрешения заключается в обработке информации, получаемой при регистрации спектрометром с сцинтилляционным блоком детектирования одной моноэнергетической линии ионизирующего излучения, и определении ширины пика полного поглощения на его полувысоте.

5. Средства измерений

5.1. Установка СПЕКТР 1, зав. № 01, зарегистрирована в Госреестре средств измерений под № 22383–02, диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения от 50 до 3000 кэВ, диапазон размеров испытываемых на установке блоков детектирования по площади выходного окна от 0,7 до 80 см².

5.2. Источники фотонного излучения радионуклидные закрытые спектрометрические эталонные ОСГИ-3 зарегистрированы в Госреестре средств измерений под № 46383–11, диапазон номинальной активности радионуклида в источнике от 5 до 1000 кБк, доверительная относительная погрешность измерений активности радионуклида не более 3 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

5.3. Термометр ртутный стеклянный ТЛ-2, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 251–49, диапазон изме-

рений температуры от 0 до 100 °С, цена деления 1 °С, абсолютная погрешность ± 1 °С.

5.4. Барометр-анероид метеорологический БАММ-1, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 5738–76, диапазон измерений атмосферного давления от 80 до 106 кПа, пределы допускаемой основной погрешности $\pm 0,2$ кПа, пределы допускаемой дополнительной погрешности $\pm 0,5$ кПа.

5.5. Психрометр аспирационный МВ-4-М, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 10069–96, диапазон измерений относительной влажности воздуха от 10 до 100 %, погрешность измерений относительной влажности не более 6 %.

5.6. Дозиметр-радиометр ДРБП-03 в комплекте с выносным блоком детектирования БДГ-01, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 16370–97, диапазон измерений энергий фотонного излучения от 0,05 до 3,0 МэВ с относительной погрешностью ± 20 %, диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы от 0,10 до 3000000 мкЗв/ч с относительной погрешностью ± 10 %.

Примечание. Допускается применение других средств измерений (СИ) и стандартных образцов (СО) утвержденных типов с аналогичными или лучшими метрологическими и/или техническими характеристиками.

6. Требования безопасности, охраны окружающей среды

6.1. Перед началом работы на установке СПЕКТР 1 оператор должен изучить «Руководство по эксплуатации» установки и требования безопасности в соответствии с [1].

6.2. При работе на установке СПЕКТР 1 с использованием источников фотонного излучения необходимо руководствоваться требованиями безопасности в соответствии с [2, 3].

6.3. Во время работы необходимо контролировать уровень энергии фотонного излучения с помощью дозиметра-радиометра по п. 5.6.

7. Требования к квалификации операторов

К выполнению измерений на установке СПЕКТР 1 допускается оператор с квалификацией инженера-физика, изучивший «Руководство по эксплуатации», прошедший соответствующий инструктаж, ознакомленный с инструкциями по технике безопасности на рабочем месте, а также обученный приемам работы:

- со спектрометрической аппаратурой;
- с источниками питания высокого напряжения для детекторов ионизирующих излучений;
- с закрытыми радиоактивными источниками гамма-излучения.

8. Условия измерений

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

- температура окружающего воздуха.....(23 ± 5) °С;
- допускаемое колебание температуры за время измерений ± 2 °С;
- атмосферное давление.....от 84,0 до 106,7 кПа
(от 630 до 800 мм рт. ст.);
- напряжение в сети 220 В;
- отклонение напряжения питания от номинального (220 В), не более $\pm 10\%$;
- относительная влажность воздуха(60 ± 20) %.

9. Подготовка к выполнению измерений

9.1. Проводят подготовку установки СПЕКТР 1 к измерениям в соответствии с «Руководством по эксплуатации» установки.

10. Выполнение измерений

10.1. Измерение эффективности регистрации гамма-излучения.

10.1.1. Набирают спектр от радионуклида ^{228}Th из комплекта ОСГИ-3 с целью градуировки по полуширине пиков и по энергиям. Режимы работы аппаратуры (усиление на УИС-02 и в АЦП) необходимо настроить так, чтобы энергетический диапазон измерений соответствовал значениям от 50 до 3000 кэВ.

10.1.2. Проводят обработку спектра ^{228}Th . Сохраняют полученные результаты градуировки по полуширине пиков и по энергиям вместе с файлом спектра ^{228}Th .

10.1.3. Убеждаются, что регистрируемый диапазон энергий соответствует значениям от (50 ± 5) до (3000 ± 200) кэВ. Если указанное соответствие не соблюдается, проводят необходимые регулировки коэффициента усиления УИС-02 и уровней дискриминации АЦП.

Примечание. Рекомендуется настроить таким образом, чтобы высокоэнергетичный пик ^{228}Th — 2614 кэВ — соответствовал не более чем 900 каналу АЦП.

После этого повторяют набор спектра от ^{228}Th и проводят градуировки по полуширине пиков и по энергиям. Сохраняют полученные файлы с результатами обработки.

10.1.4. Удаляют все источники (радионуклиды) из комнаты, в которой проводятся измерения, и трехкратно проводят измерения спектра фона в течение не менее 10 мин. Сохраняют полученные файлы.

10.1.5. Устанавливая источник ^{137}Cs из комплекта ОСГИ-3 последовательно на фиксированные расстояния от крышки детектора R_j ($R_j = 5, 10, 15, 20, 30$ см; $j = 1, 2, \dots, L$, где L — число вариантов расстояний, в данном случае $L = 5$), набирают гамма-спектры при помощи прикладной программы LSRM-32. Число импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения, соответствующего энергии 661,66 кэВ, должно быть не менее 2000 имп/с.

10.1.6. Рекомендуемое время набора каждого спектра 5 мин. При наборе спектра на расстоянии 30 см время набора следует увеличить до 10 мин.

10.1.7. Выполняют по три параллельных измерения в каждой точке по расстоянию ($m = 3$).

10.2. Измерение относительного амплитудного разрешения

10.2.1. Метод основан на регистрации на установке СПЕКТР 1 спектра ионизирующего излучения от радионуклидов ^{57}Co и ^{137}Cs из комплекта ОСГИ-3 для определения ширины пика поглощения, соответствующего моноэнергетической линии ^{137}Cs на его полувывсоте.

10.2.2. Настраивают усиление на УИС-02 и в АЦП таким образом, чтобы центроида пика от гамма-источника ^{137}Cs размещалась внутри диапазона 750–800 каналов анализатора.

10.2.3. Проводят набор спектра от источников ^{57}Co и ^{137}Cs таким образом, чтобы интегральная статистическая загрузка тракта регистрации составляла (2000 ± 200) имп/с, а в максимуме пика гамма-линии 661,66 кэВ гамма-источника ^{137}Cs было не менее 2000 имп/с. Набор спектра проводят 6 раз ($N = 6$).

11. Обработка результатов измерений

11.1. Обработка результатов измерений эффективности регистрации гамма-излучения.

11.1.1. Значение плотности потока гамма-излучения от точечного источника в телесный угол 4 стерадиан на расстоянии R от источника рассчитывают по формуле

$$\Phi = \frac{K_t \cdot Q \cdot A}{4\pi(R + R_{\text{эф}})^2}, \quad (3.1)$$

где $K_t = \exp(-0,693 \cdot t / T_{1/2})$;

$T_{1/2}$ — период полураспада ^{137}Cs ;

t — время, прошедшее с момента аттестации источника;

Q — активность источника (из свидетельства на ^{137}Cs комплекта ОСГИ);

A — относительная интенсивность линии гамма-излучения, отн. ед. (справочная характеристика: для линии 661,66 кэВ ^{137}Cs $A = (0,851 \pm 0,004)$ отн. ед.);

$R_{\text{эфф}}$ — расстояние до эффективного центра детектора.

11.1.2. Значение $R_{\text{эфф}}$ определяют следующим образом. При помощи прикладной программы LRSM-32 сначала для каждого спектра определяют значение скорости счета импульсов (загрузки) n_{ij} при регистрации гамма-излучения от ^{137}Cs . Затем для каждого расстояния j (для каждой группы из m измерений) рассчитывают среднее арифметическое значение скорости счета импульсов $\overline{n_j}$ от ^{137}Cs по формуле

$$\overline{n_j} = \sum_{i=1}^m \frac{n_{ij}}{m}. \quad (3.2)$$

Аналогично по результатам регистрации спектров фонового излучения вычисляют среднее арифметическое значение скорости счета импульсов фона \overline{b} , после чего рассчитывают среднее арифметическое значение скорости счета сигнала по формуле

$$\overline{a_j} = \overline{n_j} - \overline{b}. \quad (3.3)$$

Далее строят зависимость $1/\sqrt{a}$ от расстояния R_j . Полученную зависимость аппроксимируют уравнением прямой (для аппроксимации рекомендуется использовать математический пакет EXCEL, операцию «добавить линию тренда»). Точка пересечения аппроксимирующей прямой с осью абсцисс и указывает искомое значение $R_{\text{эфф}}$.

11.1.3. Используя найденное значение $R_{\text{эфф}}$, рассчитывают величины эффективности регистрации гамма-излучения ξ_j , см², для каждой точки j (соответствующей расстоянию R_j) по формуле

$$\xi_j = \frac{a_j}{\Phi_j}, \quad (3.4)$$

где Φ_j — плотность потока гамма-излучения на расстоянии $(R_j + R_{\text{эфф}})$ от центра источника, вычисляемая по формуле (3.1).

11.1.4. Среднее значение эффективности регистрации гамма-излучения радионуклида ^{137}Cs в диапазоне 50–3000 кэВ для точечной геометрии рассчитывают по формуле

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{j=1}^L \xi_j}{L}. \quad (3.5)$$

11.2. Обработка результатов измерений относительного амплитудного разрешения.

11.2.1. Выполняют энергетическую градуировку спектрометрического тракта по известным табличным значениям энергий пиков радионуклидов ^{57}Co ($E = 122,06$ кэВ) и ^{137}Cs ($E = 661,66$ кэВ). Обработку проводят при помощи прикладной программы LSRM-32 (градуировка — линейная, т. к. осуществляется по двум точкам).

11.2.2. Определяют относительное амплитудное разрешение η , %, по гамма-линии радионуклида ^{137}Cs — 661,66 кэВ с помощью прикладной программы LSRM-32, в которой реализован алгоритм вычислений, регламентированный в ГОСТ 26874–86.

11.2.3. Рассчитывают среднее значение относительного амплитудного разрешения как среднее арифметическое по всем проведенным по п. 10.2 измерениям по формуле

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{j=1}^N \eta_j}{N}. \quad (3.6)$$

11.3. Проверка приемлемости результатов параллельных измерений ОТХ.

11.3.1. Диапазон в относительной форме $(\xi_{\max} - \xi_{\min})/\bar{\xi} \times 100$ результатов пяти измерений эффективности регистрации гамма-излучения сопоставляют с критическим диапазоном $CR_{0,95}$ (см. формулу (3.7)), приведенным в табл. 3.2.

11.3.2. Диапазон в относительной форме $(\eta_{\max} - \eta_{\min})/\bar{\eta} \times 100$ результатов шести измерений относительного амплитудного разрешения сопоставляют с критическим диапазоном $CR_{0,95}$ (см. формулу (3.8)), приведенным в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Определяемая ОТХ, единицы измерений	Диапазон измерений	Критический диапазон (относительное значение допускаемого расхождения между наибольшим и наименьшим из пяти (шести) результатов параллельных измерений), $CR_{0,95}$ (3.7) ($CR_{0,95}$ (3.8)), %	Критический диапазон (относительное значение допускаемого расхождения между наибольшим и наименьшим из семи (восьми) результатов параллельных измерений), $CR_{0,95}$ (3.9) ($CR_{0,95}$ (3.10)), %
Эффективность регистрации гамма-излучения, см ²	От 0,2 до 80	13	14
Относительное амплитудное разрешение, %	От 5,9 до 11	4,8	5,2

11.3.3. В случае, если диапазоны $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$ $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$ не превышают значения критических диапазонов $CR_{0,95}$ (формула (3.7)) $CR_{0,95}$ (3.8)), то результаты пяти (шести) параллельных измерений признают приемлемыми и за результаты измерений принимают средние арифметические значения, рассчитанные по формулам (3.7), (3.8).

11.3.4. Если диапазоны результатов $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$ $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$ пяти (шести) измерений превышают значения критических диапазонов $CR_{0,95}$ (3.7) $CR_{0,95}$ (3.8)), необходимо получить еще два результата измерений в условиях повторяемости на том же детекторе в соответствии с разделом 10.

11.3.5. Если диапазоны результатов $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$ $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$ семи (восьми) измерений не превышают значения критических диапазонов $CR_{0,95}$ (3.9) $CR_{0,95}$ (3.10)), то результаты семи (восьми) измерений признают приемлемыми и за результаты измерений принимают средние арифметические значения, рассчитанные по формулам (3.7), (3.8).

11.3.6. Если диапазоны результатов $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$ $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$ семи (восьми) измерений превышают значения критических диапазонов $CR_{0,95}$ (3.9) $CR_{0,95}$ (3.10)), то за результат измерений принимают медиану результатов семи (восьми) измерений.

12. Оформление результатов измерений

12.1. Результаты измерений эффективности регистрации гамма-излучения и относительного амплитудного разрешения представляют в виде:

$$\xi, \text{ см}^2; \delta_L(\xi) = 8,0\%; P = 0,95; L = 5 (L = 7);$$

$$\eta, \%; \delta_L(\eta) = 3,0\%; P = 0,95; N = 6 (N = 8),$$

где ξ — результат измерений эффективности регистрации гамма-излучения, рассчитанный по формуле (3.5), либо медиана по пп. 11.3.6;

η — относительное амплитудное разрешение, рассчитанное по формуле (3.8), либо медиана по пп. 11.3.6.

12.2. Наименьший разряд числового значения определяемого показателя принимают таким же, как и наименьший разряд числового значения границ абсолютной погрешности измерений, рассчитанного по формуле (3.11).

12.3. Границы абсолютной погрешности измерений определяемого показателя Δ_L рассчитывают по формуле

$$\Delta_L = \frac{\delta_L}{100} \cdot \xi(\eta) \quad (3.11)$$

и представляют числом, содержащим две значащие цифры.

Библиографический список к лабораторной работе № 3

1. Викторов Л. В. Сцинтилляционные детекторы : словарь терминов / Л. В. Викторов, К. В. Ивановских, В. Л. Петров. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 18 с.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ 99/2010. Москва : Минздрав России, 2010. 86 с.
3. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Москва : Минздрав России, 2009. 88 с.

Содержание отчета

Студенты, проходящие лабораторный практикум по курсу «Методы и системы обнаружения делящихся материалов», представляют по лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы сцинтилляционного детектора;

- схему и основные особенности работы гамма-спектрометра;
- первичные результаты измерений основных технических характеристик (ОТХ) блока детектирования сцинтилляционного спектрометрического;
- результаты обработки первичных данных и результаты определения погрешности измерений;
- выводы по результатам измерений в соответствии с п. 12 методики, представленной выше.

Лабораторная работа № 4

Носимый радиационный монитор (НОРМ)

Цели работы:

1. Изучение устройства прибора НОРМ и особенностей его эксплуатации при обследовании территорий.
2. Приобретение навыков работы с программным обеспечением, предназначенным для обработки и накопления результатов обследования.
3. Решение задач по обследованию территорий.

1. При подготовке к настоящей лабораторной работе рекомендуется начать с просмотра видеофильма (он длится 16 мин). После этого просмотреть заголовки и первые абзацы основных разделов ИУП. Особое внимание уделить вопросам:

1.1. Состав комплекса СРК.

1.2. Состав прибора НОРМ.

1.3. Детектор, примененный в приборе НОРМ; принцип работы и особенности конструкции.

1.4. Основные задачи, решаемые с помощью прибора НОРМ.

Более подробное изучение НОРМ, программы управления, установленной на центральном компьютере, а также освоение основных методов работы предполагается выполнять после коллоквиума в ходе выполнения лабораторной работы на кафедре.

2. При подготовке к настоящей лабораторной работе необходимо изучить основы теории обнаружения, изложенные в описании лабораторной работы № 1. Рекомендуется внима-

тельно изучить при подготовке раздел 1 («Алгоритм обнаружения в режиме «неподвижный»).

Современная система радиационного контроля должна представлять собой комплексное решение проблем поиска и обнаружения источников ионизирующего излучения [1–4]. Опыт эксплуатации комплексов радиационного контроля «Соратник-01» [4] и «ПАК-1У» [1] привел к пониманию необходимости включения в существующую аппаратно-программную структуру подобных систем дополнительного носимого устройства, расширяющего их функциональные возможности и позволяющего вести обследование радиационной обстановки в недоступных для проезда местах. Для обеспечения выполнения обследования было разработано устройство, названное носимым радиационным монитором (НОРМ).

Основные технические характеристики НОРМ:

1. Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения — 0,05–3,0 МэВ.
2. Минимальная регистрируемая активность гамма-источника ^{137}Cs на расстоянии 15 м со скоростью движения источника не более 0,5 м/с при вероятности ложных тревог не более 0,05 составляет $Q_{\min 1} = 0,075$ мкКи.
3. Потребляемая мощность — не более 4,5 Вт.
4. Максимальное время непрерывной работы (без подзарядки аккумулятора) — не менее 6 ч.
5. Масса прибора (вместе с аккумулятором) — не более 10,5 кг.
6. Дальность связи по радиоканалу — 250–400 м.

Назначение прибора

Носимый радиационный монитор — компактный, высокочувствительный прибор, предназначенный для поиска источ-

ников гамма-излучения в труднодоступных местах. Прибор НОРМ отличается высокой чувствительностью: порог регистрации гамма-излучения от ^{137}Cs составляет (для условий, указанных в приложении 1) $Q_{\min} = 65$ кБк, что соответствует по ГОСТ Р 51635–2000 носимому РМ первой категории. Прибор оснащен спутниковой навигационной системой (СНС), радиоканалом для связи с центральным компьютером и упакован в заплечный станковый рюкзак для переноски оператором. Во время проведения обследования НОРМ управляется интеллектуальным модулем ИМУ и не требует участия оператора, контролирующего только минимальный набор параметров работоспособности (превышения порога безопасности по МЭД, состояние детектора, положение спутников, степень заряда аккумулятора питания). Данные о скорости счета гамма-излучения, текущие координаты и скорость движения сохраняются в памяти прибора и передаются в центр управления, где обрабатываются высокоэффективными алгоритмами обнаружения источников гамма-излучения. (Используемые алгоритмы обработки сигналов от детекторов описаны в лабораторной работе № 1 данных методических указаний).

Для сопоставления в табл. 4.1 приведены пороги регистрируемой активности для аналогичных приборов, в которых можно использовать сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI-Tl с размерами $\varnothing 63 \times 63$ мм и $\varnothing 100 \times 100$ мм. Из табл. 4.1 видно, что по порогу обнаружения детекторы на основе даже сравнительно большого по размерам кристалла NaI-Tl существенно проигрывают описываемому прибору. Следует отметить, что при увеличении размеров кристалла NaI-Tl резко ухудшаются параметры механической и температурной прочности, а также существенно возрастает стоимость прибора.

Таблица 4.1

Сцинтилляционный детектор на основе	$Q_{\min 1}$, МБк (мкКи)	$Q_{\min 2}$, кБк (мкКи)	Категория носимого РМ по ГОСТ Р 51635–2000
полистирола с добавкой РОРОР размерами $25 \times 13 \times 3,5 \text{ см}^3$	2,8 (75)	70 (1,9)	I
кристалла NaI-Tl размерами $\varnothing 100 \times 100 \text{ мм}$	7 (190)	160 (4,3)	II
кристалла NaI-Tl размерами $\varnothing 63 \times 63 \text{ мм}$	11 (300)	270 (7,3)	III

В таблице приняты следующие обозначения:

$Q_{\min 1}$ — минимальная регистрируемая активность гамма-источника ^{137}Cs при скорости движения источника не более 0,5 м/с, расстоянии 15 м, вероятности ложных тревог не более 0,05;

$Q_{\min 2}$ — минимальная регистрируемая активность гамма-источника ^{137}Cs на расстоянии 1 м, при тех же исходных параметрах контроля.

(Пороги для расстояния 1 м ($Q_{\min 2}$) в табл. 4.1 рассчитаны с целью определения категории носимого РМ в соответствии с ГОСТ Р 51635–2000).

Общий вид прибора НОРМ показан на рис. 4.1.

Кроме перечисленных узлов и компонентов, изображенных на рис. 4.1, в состав НОРМ входят также компьютер портативный типа HP 6570b ProBook с установленным прикладным программным обеспечением «SFG_NORM», блок связи с антенной радиоканала, антенна и устройство для зарядки аккумулятора.



Рис. 4.1. Общий вид прибора НОРМ (без переносного компьютера):

- 1 — блок детектирования; 2 — интеллектуальный модуль управления (ИМУ); 3 — станковый рюкзак; 3 — антенна канала радиосвязи (433 МГц); 4 — антенна СНС; 5 — выносной пульт управления; 6 — крышка ИМУ; 7 — жидкокристаллический индикатор

Описание и работа прибора НОРМ

Основой прибора НОРМ является блок детектирования (БД) гамма-излучения сцинтиляционный, предназначенный для преобразования потока гамма-квантов в электрические сигналы. В сцинтиляционном пластиковом детекторе гамма-

кванты преобразуются в короткие световые вспышки, которые далее с помощью ФЭУ, приклеенного оптическим клеем к сцинтиллятору, преобразуются в электрические импульсные сигналы. Последние после усиления и формирования в усилителе-формирователе УФ поступают на счетный вход микропроцессора.

ИВН предназначен для преобразования постоянного напряжения +12 В в высокое напряжение (порядка 1400 В), необходимое для питания ФЭУ. Высокое напряжение поступает на электроды ФЭУ через делитель напряжения ДН.

Аккумуляторная батарея (АБП) обеспечивает автономное электропитание всех электронных компонентов прибора НОРМ.

Центром управления прибора НОРМ является интеллектуальный модуль управления ИМУ на базе микроконтроллера AT91SAM7SE256 фирмы ATMEL. Согласно алгоритмам, реализованным в программном обеспечении ИМУ, происходит управление процедурой измерения скорости счета гамма-излучения, обеспечивается посекундная синхронизация информации с данными от приемника СНС, формируются записи в локальную базу данных, а также передача результатов измерений в базу данных центра управления в ответ на запрос, полученный средствами радиоканала или канала связи RS485.

Выносной пульт управления (ВПУ) предназначен для быстрого (оперативного) управления работой НОРМ при использовании прибора по основному назначению — при поиске ИИИ.

Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) имеет чисто технологические функции, т. е. обеспечивает удобство эксплуатации прибора НОРМ.

Назначение антенны СНС и антенны радиоканала понятно из их названий.

Структурная схема прибора приведена на рис. 4.2.

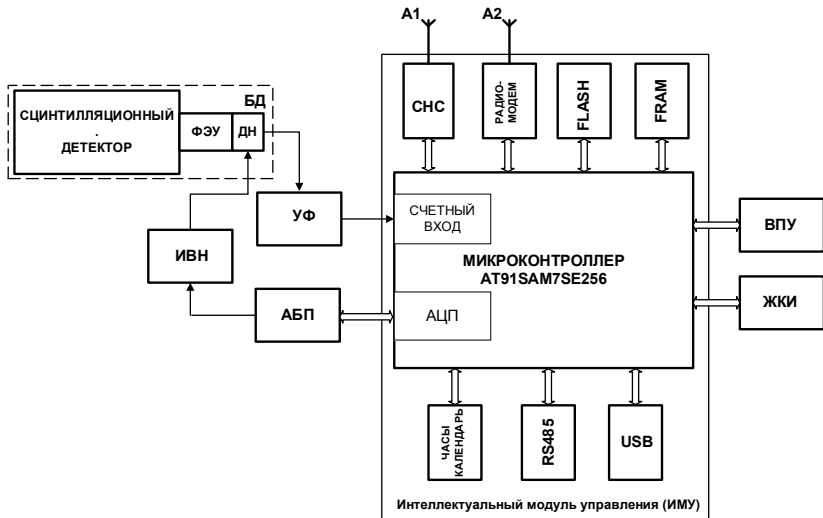


Рис. 4.2. Структурная схема прибора

Основные компоненты прибора НОРМ, размещенные на схеме:

- БД — блок детектирования гамма-излучения, который в свою очередь содержит:
 - сцинтилляционный пластиковый детектор размерами $25 \times 13 \times 3,5 \text{ см}^3$;
 - фотоэлектронный умножитель (ФЭУ);
 - делитель напряжения (ДН);
- УФ — усилитель-формирователь.
- АБП — аккумуляторная батарея автономного электропитания (Delta тип DTM–12045 12V, 4,5 Ah).
- ИВН — источник высокого напряжения.
- ИМУ — интеллектуальный модуль управления в составе:
 - микроконтроллер AT91SAM7SE256;
 - СНС — приемник спутниковой навигационной системы;
 - радиомодем РМД400–1;

- набор элементов энергонезависимой памяти (FLASH и FRAM память);
- модуль «часы-календарь»;
- модуль интерфейса RS485;
- модуль интерфейса USB.
- ПУ — выносной пульт управления.
- ЖКИ — жидкокристаллический индикатор.
- А1 — антенна СНС.
- А2 — антенна радиоканала.

Краткое описание основных компонентов прибора

Блок детектирования

Блок детектирования сцинтилляционный состоит из собственно детектора, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и делителя напряжения (ДН) для питания ФЭУ.

Основное назначение детектора — преобразование гамма-квантов в короткие световые вспышки (сцинтилляции). В используемом пластмассовом детекторе длительность сцинтилляции не превышает 5 нс.

Детектор представляет собой прозрачную пластмассу на основе полистирола с добавкой активатора (*p*-терфенил) и т. н. смесителя спектра (РОРОР) для согласования спектра световой вспышки со спектральной чувствительностью фотокатода ФЭУ. [www.detectors.saint-gobain.com]).

Пластмассовый детектор изготавливается в форме прямоугольного параллелепипеда ($25 \times 13 \times 3,5$ см³) с полированными поверхностями. Для обеспечения качественного светособирания от сцинтилляционной вспышки детектор снабжается зеркальным отражателем.

К торцу детектора приклеен ФЭУ, в котором световые вспышки преобразуются в электрические импульсные сигналы. В приборе НОРМ используется ФЭУ фирмы Hamamatsu типа R-580-17, отличающийся высокой чувствительностью

и помехозащищенностью. Питание на электроды ФЭУ подается от ИВН через резистивный делитель напряжения (ДН). ИВН обеспечивает питание ФЭУ напряжением порядка 1400 В. В качестве ИВН используется DC-DC преобразователь фирмы Traco Power — PHV 12–2.0K 2500P. Модуль допускает изменение входного напряжения от 10,8 до 16,5 В при выходном напряжении до 2000 В и токе нагрузки до 2,5 мА. Выходное напряжение имеет положительную полярность. [<http://www.tracopower.com/products/browse-by-category/find/phv/3/>].

С выхода блока детектирования импульсы передаются по кабелю на вход усилителя-формирователя (УФ). Усилитель-формирователь (УФ) обеспечивает усиление сцинтимпульсов, поступающих с анода ФЭУ, и формирование из них счетных импульсов, нормированных по амплитуде (12 В) и длительности 1 мкс. УФ содержит настраиваемый дискриминатор нижнего уровня (ДНУ) для защиты от шумов.

ИМУ прибора НОРМ

Интеллектуальный модуль управления является «центром управления» прибора НОРМ. ИМУ разработан на базе микроконтроллера AT91SAM7SE256 фирмы ATMEL.

Ниже перечислены дополнительные электронные компоненты, входящие в состав ИМУ, и дано их основное назначение.

Приемник спутниковой навигационной системы (СНС), предназначен для определения текущего местоположения прибора в пространстве. Применен приемник фирмы Trimble — Lassen iQ GPS.

- Радиомодем РМД400–1 в OEM варианте (в виде встраиваемого модуля) предназначен для обмена данными с центром обработки информации при работе прибора под внешним управлением.
- Модуль интерфейса RS485. Используется для работы прибора в составе комплекса радиационного контроля

- (например, в составе портального радиационного монитора на КПП).
- Модуль интерфейса USB. Необходим для оперативной передачи информации, накопленной в автономной памяти прибора, на центральный компьютер.
- Модуль «часы-календарь» — для синхронизации измерений во времени.
- Набор элементов энергонезависимой памяти (FLASH и FRAM память). Предназначен для сохранения получаемой в ходе работы информации.



Рис. 4.3. Интеллектуальный модуль управления

Интеллектуальный модуль управления снабжен специальным программным обеспечением для управления процедурами измерения и обеспечения синхронной посекундной записи результатов измерений (скорости счета детектора гамма-излучения с координатами точки измерения, получаемыми от СНС) как в локальную энергонезависимую память, так и в базу данных центра управления по радиоканалу или по каналу связи RS485.

Модуль управления (см. рис. 4.3) имеет простейший интерфейс для взаимодействия с оператором. На ЖКИ отображается текстовое меню и оперативная информация о текущем состоянии, а навигация по меню и исполнение команд осуществляется с помощью кнопок на панели управления:

1. Кнопка 1 (левая) — вверх по меню.
2. Кнопка 2 (средняя) — исполнение.
3. Кнопка 3 (правая) — вниз по меню.

Меню имеет следующий вид:

1. Измерение
 - 1.1. Старт — запустить измерение.
 - 1.2. Стоп — остановить измерение.
 - 1.3. Возврат — возврат в меню верхнего уровня.
2. Тест
 - 2.1. Детектор — на ЖКИ отображается текущая скорость счета.
 - 2.2. Контроль ВПУ — тест световых индикаторов пульта и звукового сигнала.
 - 2.3. АБП — измеряется напряжение аккумулятора.
 - 2.4. Память — выводится степень заполнения памяти в процентах и количество записанных файлов с измерениями.
 - 2.5. Возврат — в меню верхнего уровня.
3. Настройки
 - 3.1. Интервал измерения — выбирается интервал 0,5 с, 1 с.
 - 3.2. Длительность серии — задается время одной серии измерения в секундах.
 - 3.3. Порог АБП — задается минимальное значение напряжения аккумулятора.
 - 3.4. Порог МЭД — значения МЭД для включения сигнала тревоги.
 - 3.5. Коэффициент МЭД — задается коэффициент для расчета МЭД.
 - 3.6. Дата — установка текущей даты.
 - 3.7. Время — актуальное время.

3.8. Часовой пояс.

3.9. Возврат.

ЖКИ оснащен подсветкой для работы при плохом освещении. В целях экономии энергии после 10 секунд простоя дисплей переходит в состояние ожидания с отключением подсветки. Из состояния ожидания ЖКИ выводится нажатием любой кнопки, при этом дисплей переводится в активный режим и включается подсветка.

Интервал измерения — временной интервал одного отсчета, в течение которого происходит подсчет импульсов от БДП.

Длительность серии — продолжительность одной серии измерения.

Порог АБП — порог напряжения заряда аккумуляторов, при достижении которого прибор начинает выдавать звуковое предупреждение пользователю. Частота звуковых импульсов растет по мере разряда АБП.

Порог МЭД — максимально допустимый порог МЭД, по превышению которого прибор выдает пользователю тревожное сообщение и включает звуковой сигнал.



Рис. 4.4. Выносной пульт управления (ВПУ)

ВПУ предназначен для оперативного контроля и управления прибором. Во время работы прикрепляется к лямке рюкзака так, чтобы он находился в поле зрения оператора. На выносном пульте управления расположены три световых индикатора (красный и два зеленых) и одна кнопка. Кнопка используется для пуска и остановки измерения. По нажатию данной кнопки во время измерения текущее измерение сохраняется во флэш-памяти прибора с внесением всех требуемых изменений в архитектуру применяемой файловой системы (количество файлов, длина «записи» и т.д.). Таким образом, пользователь может принудительно сохранить последнюю серию измерений (например, перед заменой аккумулятора).

Световые индикаторы отражают текущее состояние прибора следующим образом:

Таблица 4.2

Состояния индикаторов

Состояние индикаторов	Описание
Зеленый индикатор № 2 горит постоянно.	Включено питание прибора.
Красный индикатор № 1 мигает с частотой 1 Гц.	Есть связь с GPS. Количество спутников недостаточно для определения координат. (меньше 3 спутников).
Красный горит постоянно. Слышен звуковой сигнал.	Ошибка прибора или сигнал тревоги. Источник ошибки выводится на ЖКИ.
Зеленый индикатор № 3 мигает с частотой 1 Гц.	Запущен процесс измерения. Штатный режим.
Зеленый индикатор № 3 погашен.	Измерение остановлено.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Лабораторная работа начинается с коллоквиума, на котором подробно обсуждаются вопросы, изложенные в пп. 1 и 2 предисловия.
2. Включается прибор и выполняются контрольные проверки по пункту меню «Тест».
3. Выполняется пробное измерение с проверкой записи результата во внутреннюю память прибора.
4. Выполняется обход обследуемой территории по заданному маршруту.
5. Выполняется считывание данных, накопленных во время обхода в базу данных центрального компьютера.
6. Выполняется обработка полученных данных с целью решения задачи обнаружения источников гамма-излучения и уточнения их местоположения.
7. Составляется отчет о проделанной работе.

Содержание отчета

Студенты представляют о проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- состав прибора НОРМ и назначение основных компонентов, входящих в его состав;
- описание порядка подготовки прибора к работе и хода обследования заданной территории;
- формулировку кратких выводов по результатам выполнения работы с критическими замечаниями о работе прибора и программного обеспечения;
- необходимый иллюстративный материал с результатами решения задач обнаружения и фиксации местоположения ИИИ. По каждому случаю обнаружения представить краткий комментарий. По наиболее «ярким» случаям представить объяснения и выводы.

Библиографический список к лабораторной работе № 4

1. Мобильные комплексы радиационного контроля: сборник научных разработок / под ред. проф. Б. В. Шульгина и А. В. Кружалова. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 137 с.
2. Пат. 2140660 Российская Федерация, МПК G01T 1/167. Способ обнаружения слабых потоков ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Кружалов А. В., Шеин А. С., Шульгин Б. В., Шульгин Д. Б. № 98102583; заявл. 10.02.1998; опубл. 27.10.1999, Бюл. № 17.
3. Пат. 2242024 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Ивановских К. В., Лазарев Ю. Г., Петров В. Л., Шеин А. С., Шульгин Б. В. № 2003119905; заявл. 30.06.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 3.
4. Пат. 2456638 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Шеин А. С., Викторов Л. В., Кунцевич Г. А., Петров В. Л., Шульгин Б. В. Заявл. 29.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

Лабораторная работа № 5

Комплекс СРК «Соратник-01». Изучение устройства и особенностей эксплуатации. Решение задач обнаружения ИИИ


Цели работы:

1. Изучение устройства и особенностей эксплуатации комплекса СРК «Соратник-01».
2. Овладение основами теории и методов решения задач обнаружения ИИИ средствами комплекса СРК.
1. Для выполнения настоящей лабораторной работы используется «Учебное программное обеспечение комплекса «Соратник-01» (УПО-01), написанное для офицеров,готавливаемых к обслуживанию комплекса, и для курсантов военных училищ. Часто встречающееся в текстах УПО-01 слово «курсант» авторы лабораторного практикума (подготовленного для студентов) просят читать как «студент».

Наиболее полно вопросы устройства и особенностей эксплуатации комплекса СРК «Соратник-01» изложены в документе «Комплекс СРК «Соратник-01 К4310». Руководство по эксплуатации», который оформлен в 2 частях, размещен в папке «УПО-01\Эксплуатац_Докум_Соратник-01» в файлах «РЭ1-К4310–3.05» и «РЭ2-К4310». Здесь К4310 означает конкретную марку автомобиля: автомобиль большой грузоподъемности (шасси КАМАЗ-43114) с кузовом-фургоном универсальным герметизированным (КУНГ).

Однако, поскольку «Руководство по эксплуатации...» написано в соответствии со старыми ГОСТами, и с ним непросто

работать (более 400 стр. машинописного текста, без интерактивных связей и т. п.), для «ознакомительного этапа» обучения персонала было создано «Учебное программное обеспечение УПО-01».

УПО-01 состоит из трех независимых фрагментов, запускаемых после открытия при помощи иконки  Soratnik общего диалогового окна:

- Интерактивное учебное пособие (ИУП).
- Тренажер-имитатор.
- Видеофильм.

ИУП представляет собой специальную «электронную книгу», предназначенную для изучения комплекса, которая содержит подробные сведения о комплексе СРК и способах решения основных задач, выполняемых аппаратными и программными средствами комплекса. ИУП выполнен в форме текстов в *.html и поясняющих рисунков; ИУП имеет внутренние интерактивные связи.

2. При подготовке к настоящей лабораторной работе рекомендуется начать с просмотра видеофильма (он длится 16 мин). После этого просмотреть заголовки и первые абзацы основных разделов ИУП. Особое внимание уделить вопросам:

- 2.1. Состав комплекса СРК.
- 2.2. Режимы питания, используемые в комплексе РК.
- 2.3. Детекторы, используемые в комплексе РК; принцип работы и особенности конструкции.
- 2.4. Основные задачи, решаемые с помощью аппаратных и программных средств комплекса.

Более подробное изучение основных разделов ИУП, а также освоение основных этапов работы с комплексом СРК с помощью «Тренажера-имитатора» предполагается выполнять после коллоквиума в ходе выполнения лабораторной работы на кафедре.

3. При подготовке к настоящей лабораторной работе необходимо изучить основы теории обнаружения, популярно изложенной в брошюре «Алгоритмы обнаружения» (файл с тем же названием «Алгоритмы обнаружения»). Рекомендуется внимательно изучить при подготовке раздел 1 упомянутой брошюры («Алгоритм обнаружения в режиме «неподвижный»).

В результате изучения предлагается ответить на контрольные вопросы, изложенные в п. 1 раздела «Учебно-тренировочные задачи\Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»». Имеется в виду задача (работа) № 1: «Обнаружение неподвижного источника нейтронного излучения с помощью комплекса «Соратник-01». В конце описания указанной работы перечислены предлагаемые контрольные вопросы.

Порядок выполнения лабораторной работы

1 Лабораторная работа начинается с коллоквиума, на котором подробно обсуждаются вопросы, изложенные в пп. 2 и 3.

2. Выполняются учебно-тренировочные задачи из ИУП, №№ с 1 по 6 и 8, из раздела «Имитация включения/выключения, переключения режимов работы комплекса «Соратник-01». (Задачу № 7 рекомендуем исключить, т. к. в ней слишком много «виртуального»; указанную задачу целесообразно решать на реальной аппаратуре).

3. Выполняются учебно-тренировочные задачи из ИУП, №№ 1 и 2, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01». А именно: выполняются повторные обработки данных, полученных при проведении реальных измерений с помощью комплекса СРК «Соратник-01», с целью решения задачи обнаружения нейтронного излучения для различных ситуаций путем задания измененных параметров обработки. Последовательность выполнения указанных работ №№ 1 и 2 и все подробности изложены в ИУП, в соответствующих вкладках.

Содержание отчета

Студенты представляют о проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- состав комплекса СРК и назначение основных устройств, входящих в комплекс;
- краткие выводы по результатам выполнения учебно-тренировочных задач из ИУП, №№ с 1 по 6 и 8, из раздела «Имитация включения/выключения, переключения режимов работы комплекса «Соратник-01»;
- таблицы с результатами решения задач обнаружения при выполнении учебно-тренировочных задач из ИУП, №№ 1 и 2, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01». По каждому случаю представить краткий комментарий. По наиболее «ярким» случаям представить объяснения и выводы.

Лабораторная работа № 6

Комплекс СРК «Соратник-01». Решение задач обнаружения и идентификации радионуклидов

Цели работы:

1. Овладение основами теории и методов решения задач обнаружения ИИИ средствами комплекса СРК (продолжение работ, начатых при выполнении лабораторной работы № 4).
2. Овладение методами решения задач идентификации радионуклидов по гамма-спектрам при помощи программы LSRM-USTU.

1. Для выполнения настоящей лабораторной работы используется «Учебное программное обеспечение комплекса «Соратник-01» (УПО-01), созданное для офицеров, подготавливаемых к обслуживанию комплекса СРК, и для курсантов военных училищ. В состав УПО-01 входит часто встречающееся в текстах УПО-01 слово «курсант», автор настоящего лабораторного практикума (подготовленного для студентов) просит читать как «студент».

Наиболее полно вопросы работы с ППО изложены в соответствующих «Руководствах оператору», встроенных в интерактивное учебное пособие (ИУП, вкладка «Приложения»):

А. Прикладное программное обеспечение «СОРАТНИК-01». Руководство оператора.

Б. Прикладное программное обеспечение LSRM_UGTU. Руководство оператора.

2. При подготовке к настоящей лабораторной работе рекомендуется еще раз вспомнить изученные при выполнении предыдущей лабораторной работы № 1 основы теории обнаружения, популярно изложенные в брошюре «Алгоритмы обнаружения» (файл с тем же названием «Алгоритмы обнаружения»). При подготовке рекомендуется особо внимательно изучить раздел 1 упомянутой брошюры («Алгоритм обнаружения в режиме «неподвижный»).

Рекомендуется подготовить вопросы для обсуждения по теме «Алгоритмы обнаружения» и, в частности, какие моменты оказались не поняты.

При подготовке к коллоквиуму необходимо подготовить ответы на контрольные вопросы:

- На каком критерии основывается алгоритм обнаружения и почему?
- Каков физический смысл вводимых и используемых в алгоритме обнаружения параметров? Особо обратить внимание на термины «достаточная статистика» (обозначается η), порог обнаружения q_0 и вероятность ложной тревоги $\alpha = P_{\text{лт}}$.
- В каких случаях используют критерий обнаружения Байеса? В чем его главные отличия от критерия Неймана-Пирсона?
- Какова зависимость порога обнаружения (скорости счета сигнала a_{\min} и плотности потока Φ_{\min}) от задаваемых значений времени экспозиции, уровня фона, вероятности ложной тревоги, количества детекторов?

3. При подготовке к настоящей лабораторной работе необходимо изучить вводные разделы документа «Прикладное программное обеспечение LSRM_UGTU. Руководство оператора» (в частности, уяснить назначение программы, основные задачи, решаемые с помощью этой программы).

Особо тщательно изучить раздел «Идентификация радионуклидов и расчет активности точечного источника».

К коллоквиуму подготовить ответы на следующие вопросы:

- Основные термины из области сцинтилляционной техники и гамма-спектрометрии.
- Что такое гамма-спектр? От чего зависит вид спектра? Какие бывают спектры?
- Почему по гамма-спектру можно решать задачи идентификации радионуклидов? В чем состоит задача идентификации радионуклидов?
- Какие радионуклиды используют для калибровки по энергии и почему?

Безусловно, детальное ознакомление с программой LSRM_UGTU и освоение основных приемов работы с ней предполагаются в ходе непосредственного выполнения лабораторной работы.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Лабораторная работа начинается с коллоквиума, на котором подробно обсуждаются вопросы, изложенные в пп. 2 и 3.

2. Выполняются учебно-тренировочные работы из ИУП, №№ 4 и 5, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01». А именно: выполняются тренировочные работы **«Имитация процедуры обнаружения источника излучения в режимах «Неподвижный» ... и «Подвижный» и «Идентификация источника гамма-излучения».**

Последовательность выполнения указанных работ №№ 4 и 5 и все подробности изложены в ИУП, в соответствующих вкладках.

- Рекомендуемое время измерения фона — 200 с; сигнала в режиме «неподвижный» — 100 с.
- Рекомендуемые параметры контроля в режиме «Подвижный»: расстояние до объекта — 50 м; скорость — 5 м/с.

- Уровни имитируемых сигналов задает преподаватель путем редактирования файлов инициализации.

Внимание!

Редактирование файлов инициализации студентам не разрешается! (Поскольку некорректное редактирование может привести к отказу или сбою в работе ПО «Соратник-01»).

3. Выполняется учебно-тренировочная работа № 3 из ИУП, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01».

Тренировочная работа «Идентификация источника гамма-излучения»

Главные этапы выполнения работы таковы:

3a. Выполнить градуировку энергетической шкалы по специально набранному (измеренному) спектру радионуклида Th-228, т.е. по спектру «1910_ТН_Град.sp» в папке C:\LSRMCcustomUGTU\ДГ_01\Lab_workN3.

3b. По этому же спектру выполнить калибровку по полуширине. Сохранить все калибровки в файле спектра и в файле setgam.

3c. Открыть файл «sp1.sp», перенести на него полученные калибровки и далее решить задачу идентификации радионуклида, от которого набран спектр sp1.sp.

3d. Сохранить отчет по этой конкретной обработке.

3e. Повторить пп. *3a–3d* со следующим спектром sp2.sp. Обработать аналогичным методом всего не менее 4 спектров с неизвестными радионуклидами. Сохранить результаты обработки для отчета.

Перечисленные этапы выполнения работы с более подробными указаниями изложены в ИУП, задача № 3.

Содержание отчета

Студенты представляют о проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- таблицы с результатами решения задач обнаружения при выполнении учебно-тренировочных задач из ИУП, №№ 4 и 5, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01». По каждому случаю представить краткий комментарий. По наиболее «ярким» случаям представить объяснения и выводы;
- результаты обработки спектров, копии экрана не менее чем с 4 обработанными спектрами и соответствующие протоколы по результатам решения задач идентификации радионуклидов.

Лабораторная работа № 7

Измерения основных технических характеристик детекторов нейтронов

Цель работы:

1. Изучение физических принципов работы детекторов нейтронного излучения на основе ^3He -счетчиков.
2. Изучение прикладных вопросов выполнения измерений с использованием упомянутых детекторов.
3. Ознакомление с метрологическими аспектами проведения измерений основных технических характеристик (ОТХ) блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических.
4. Выполнение измерений ОТХ детекторов нейтронного излучения с оценкой погрешности результатов измерений.

Настоящее описание лабораторной работы основано на использовании документа «Методика измерений эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов на стенде» (МВИ 5/95), разработанного на кафедре экспериментальной физики УрФУ и аттестованного Федеральным государственным унитарным предприятием «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ») 09.12.95 г.

Важно особо подчеркнуть, что разработка и аттестация методики выполнения измерений являлись важнейшими этапами создания метрологического обеспечения производства детекторов нейтронного излучения. Безусловно, не менее важ-

ным являлись разработка и создание образцовой установки «Стенд для измерения эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов», ее метрологическая аттестация и периодическая проверка органами Госстандарта РФ (Новое название: «Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии»).

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться с «Техническим описанием и инструкцией по эксплуатации стенда (установки) для измерения эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов» (ТО), в котором изложены технические характеристики, устройство и принцип действия, а также правила эксплуатации установки. Файл «ТО_Детекторы_Нейтр» прилагается.

Кроме того, студенты должны вспомнить:

- основные термины по технике детектирования нейтронного излучения и их физический смысл;
- основные термины и понятия из метрологии, а также теории вероятностей (в частности, что такое среднее арифметическое значение, медиана, среднее квадратичное отклонение (СКО), законы распределения случайных величин).

Обязательным является также предварительное изучение и соблюдение правил радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующих излучений в соответствии с [1, 2].

Ниже начиная со слов «Детекторы нейтронного излучения» приводится дословный текст «Методики измерений эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов на стенде» (МВИ 5/95). В соответствии с указанной МВИ выполняется практическая часть лабораторной работы № 3. Требования к отчету по лабораторной работе № 3 сформулированы в конце, после МВИ 5/95.

ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методика измерений эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов на стенде МВИ 5/95

Настоящий документ устанавливает методику выполнения измерений эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов типа МРДИ-01 (ДИН) на измерительном стенде.

Эффективность регистрации нейтронов (ЭРН) численно равна отношению средней частоты следования импульсов, измеренной на выходе детектора, к плотности потока нейтронов, падающих на поверхность детектора.

1. Нормы погрешности измерений

Методика выполнения измерений обеспечивает выполнение измерений эффективности регистрации нейтронов с относительной погрешностью, не превышающей 13 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

2. Средства измерений и вспомогательные устройства

2.1. Измерительный стенд (установка), в состав которого входят:

2.1.1. Источник нейтронного излучения (ИНИ) типа НК252 М11.16 на основе радионуклида калифорний-252 (^{252}Cf); поток нейтронов от источника в телесный угол 4π — $1,1 \cdot 10^6$ н/с на 27.06.95, погрешность измерения потока нейтронов — не более 10 %. Средняя энергия нейтронов 2,13 МэВ. Период полураспада — 2,64 года.

2.1.2. Измерительная линейка (рулетка), обеспечивающая измерение расстояния в диапазоне до 20 м с ценой деления 5 мм.

2.1.3. Экранирующий усеченный конус из борированного полиэтилена длиной 400 мм по ГОСТ 8.355.

2.1.4. Передвижная платформа для установки источника нейтронов в рабочее положение, снабженная манипуляторами. С помощью манипуляторов осуществляются безопасное

и удобное перемещение источника нейтронов из защитного контейнера в рабочее положение на линию визирования (на высоту 6,00 м по отношению к полу), повороты ИНИ вокруг своей оси, а также установка (или, при необходимости, удаление) экранирующего конуса на линию (с линии) визирования.

2.1.5. Защитный контейнер для источника нейтронов. Обеспечивает ослабление потока нейтронов от источника ИНИ до значения, соответствующего на расстоянии 1 м от поверхности контейнера поглощенной дозе не более 80 мкбэр/ч по нейтронному излучению и не более 60 мкбэр/ч по гамма-излучению.

2.1.6. Частотомер электронно-счетный типа ЧЗ–34^(*). Диапазоны регистрируемых частот: 0,1; 1; 10; 100 Гц; 1; 10; 100 кГц; 1, 10 МГц в импульсном режиме; 5, 10, 50 МГц (синусоидальные). Входной импульсный сигнал от 0,1 до 400 В. Нестабильность частоты внутреннего кварцевого генератора $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ через 30 минут после включения. Выходные импульсные сигналы: частота от 0,1 Гц до 10 МГц, амплитуда ≥ 1 В.

2.1.7. Генератор импульсов типа Г5–54^(*). Выход основной: длительность импульсов от 0,5 до 1000 мкс. Нестабильность длительности $< 3\%$. Длительность фронта импульсов 50 и 100 нс. Амплитуда импульсов на нагрузке 500 Ом от $5 \cdot 10^{-4}$ до 50 В. Погрешность установки амплитуды 0,1 У. Частота повторения импульсов от 0,01 до 100 кГц. Погрешность установки частоты $< 0,1\%$; нестабильность частоты за 1 час работы $< 3\%$.

2.1.8. Осциллограф типа С1–65^(*).

2.1.9)*. Персональный компьютер типа IBM PC в следующей комплектации:

- процессор — не менее 386SX, 40 МГц;
- оперативная память 2 Мбайт;
- дисплей цветной VGA;
- накопитель на жестком магнитном диске 220 Мбайт;

- русифицированная клавиатура;
- имеются 2 последовательных порта ввода-вывода;
- принтер.

2.1.10.)* Блоки и узлы сопряжения ПЭВМ с детектором нейтронов и с генератором импульсов: блок сопряжения МРБС-03 (ГВАТ. 467316.001), блок коммутационный МРКУ-03 (ГВАТ. 468361.001).

2.1.11. Блок питания МРБП, обеспечивающий питание 27 В для блока МРБС и для ДИН (ДЕ2.087.131).

2.1.12.)* Прикладное программное обеспечение TESTDIN, работающее в операционной среде MS DOS, версия от 30.05.95, и соответствующее базовое ПО — операционная система MS DOS, версия 6.22. Текст программы на магнитных носителях.

2.1.13. Техническое описание и инструкция по эксплуатации стенда (с комплектом схем и руководством оператора по работе с ПО — в приложении).

2.1.14. Технические описания и инструкции по эксплуатации к блокам и приборам, входящим в состав стенда.

2.2. Вспомогательные устройства:

2.2.1. Термометр по ГОСТ 2045.

2.2.2. Барометр по ГОСТ 6359.

2.2.3. Психрометр по ГОСТ 6353.

2.2.4. Радиометр нейтронов типа МКС-01 Р по ГОСТ 28271. Диапазон измерений по γ -излучению — от 1 до $3 \cdot 10^5$ мкбэр/ч, погрешность $\leq 20\%$. Диапазон измерений плотности потока нейтронов — от 10^{-4} до $3 \cdot 10^8$ н/(м²·с); погрешность $\leq 30\%$.

Примечания:

1*. Вместо приборов и компонентов, помеченных знаком (*), допустимо применение других типов приборов с аналогичными параметрами. Допустимо также применение другого (модернизированного) компьютера IBM PC по сравнению с описанным в п. 2.1.9 и соответственно — других устройств сопряжения де-

тектора МРДИ или ДИН с компьютером и другого программного обеспечения.

2*. Детектор типа МРДИ-01 (ДЕ 2.204.003) или ДИН (аналогичный по конструкции и техническим характеристикам детектору МРДИ-01) не входит в состав стенда. Однако указанные детекторы используются при аттестации и поверках стенда, а также в качестве аттестуемых на стенде приборов.

3. Требования безопасности

Работы на стенде следует проводить в соответствии с требованиями безопасности основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений — ОСПОРБ-99/2010 [1], нормами радиационной безопасности — НРБ-99/2009 [2], а также правилами радиационной и электробезопасности, указанными в техническом описании и инструкции по эксплуатации стенда [3].

Работы на стенде должны проводить лица, допущенные медицинскими органами к работе с источниками ионизирующего излучения.

4. Требования к квалификации оператора

К выполнению измерений на стенде допускаются лица, имеющие высшее или среднее специальное образование, практический опыт работы по измерению ионизирующих излучений, сдавшие технический минимум по устройству стенда и принципу его работы, знания настоящей методики выполнения измерений.

5. Условия выполнения измерений

5.1. При выполнении измерений следует соблюдать следующие условия:

- температура воздуха в помещении ($18 \div 28$)°С;
- относительная влажность воздуха ($30 \div 80$) %;
- атмосферное давление ($84 \div 106,7$) кПа.

5.2. Уровень фона по нейтронному излучению должен быть не более 80 нейтр./($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и по гамма-излучению — не более 0,1 мкР/с.

5.3. Напряжение в сети 220 ± 10 В.

6. Подготовка к выполнению измерений

6.1. Проводят подготовку стенда к измерениям в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации.

6.2. Измерение эффективности регистрации нейтронов детектором (ДИН) проводят в широком пучке быстрых нейтронов от источника нейтронного излучения (ИНИ) ^{252}Cf с использованием методики экранирующего конуса (ЭК) в соответствии с ГОСТ 8.355 [4].

Нейтронный источник располагают так, чтобы его продольная ось симметрии была параллельна передней поверхности детектора.

Геометрические центры источника нейтронов, экранирующего конуса и детектора должны находиться на одной линии — линии визирования.

Неоднородность нейтронного поля по площади детектора в широком пучке не должна быть больше 5 %. (Это условие накладывает ограничение на минимальную дальность! Легко оценить из простых геометрических соотношений, что минимальная дальность соответствует примерно 3,0 м).

7. Выполнение измерений

7.1. После проведения подготовительных работ, описанных в разделе 6, включают в сеть все средства измерений и вспомогательное оборудование, входящее в стенд, и прогревают их. Расстояние между геометрическими центрами ДИН и ИНИ устанавливают любое, удобное по условиям зала в диапазоне 5...9 м. После выхода аппаратуры на рабочий режим приступают к измерениям.

7.2. Проверка стабильности работы детектора (стабильности параметра «эффективность регистрации нейтронов»).

Определение стабильности работы детектора проводят с целью проверки на отсутствие недопустимых при нормальной работе детектора выбросов, которые могут создаваться вследствие утечек или пробоев в высоковольтной части детектора,

либо иными дефектами в электрической схеме детектора. Указанная проверка осуществляется в следующей последовательности.

7.2.1. Экранирующий конус удаляют с линии визирования ДИН–ИНИ. Устанавливают с помощью ПО начальные условия измерений: длительность серии измерений $t_c \geq 1000$ с, количество серий — не менее 10. Измерения выполняют в течение 8 часов.

7.2.2. При выбранном расстоянии R_1 проводится измерение суммарного счета N_i и скорости счета n_i от детектора ДИН в десяти сериях при заданной длительности серии ($N_i = n_i \cdot t_c$).

7.2.3. Определяется среднее значение скорости счета:

$$\bar{n} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} n_i. \quad (7.1)$$

7.2.4. Вычисляется максимальное отклонение скорости счета от среднего значения, характеризующее искомую стабильность работы детектора:

$$\Delta_{\text{эф}} = \left| \frac{\bar{n} - n_m}{\bar{n}} \right| \cdot 100 \%, \quad (7.2)$$

где n_m — максимальное или минимальное значение n_i (расчет по формуле (7.2)) проводится и для максимального, и для минимального значения n_i). Результат проверки стабильности работы детектора считается положительным, если выполняется условие:

$$\Delta_{\text{эф}} \leq 1,5 \%. \quad (7.3)$$

Примечания:

- Неравенство (7.3) решают для наибольшего значения $D_{\text{эф}}$ из вычисленных по формуле (7.1).
- Проверку детектора по п. 7.2.2 проводят при постоянном положении оборудования и персонала во время измерений.

7.3. Выполнение измерений для определения основной характеристики детектора ДИН — эффективности регистрации нейтронов.

Измерения по настоящему пункту проводят для трех значений расстояний между геометрическими центрами ДИН и ИНИ: $R_1 = 5$ м, $R_2 = 6$ м, $R_3 = 7$ м. При установке ИНИ допустимы отклонения указанных расстояний в пределах $\pm 0,3$ м, однако погрешность измерения расстояний не должна превышать 0,5 %.

7.3.1. Экранирующий конус удаляют с линии визирования ДИН–ИНИ.

Устанавливают с помощью ПО начальные условия измерений: длительность серии измерений $t_c \geq 500$ с, количество серий — 3.

Примечание. Длительность серии может быть выбрана меньше 500 с, однако должно соблюдаться условие: суммарный счет от детектора за время t_c должен быть не ниже, чем 40000.

7.3.2. При расстоянии R_1 проводится измерение суммарного счета N_{1i} и скорости счета от детектора n_{1i} в трех сериях при заданной длительности серии. Результаты измерений сохраняются в соответствующем файле (см. в п. 2.1.13).

7.3.3. Экранирующий конус устанавливается на линию визирования ДИН–ИНИ.

7.3.4. При тех же условиях, что и в п. 7.3.1, проводятся три серии измерений, аналогичных описанным в п. 7.3.1. В результате получают скорости счета фона b_{2i} в соответствующем файле.

7.3.5. При расстояниях $R_2 = 6$ м, $R_3 = 7$ м повторяют измерения в последовательности, описанной в пп. 7.3.1–7.3.3. В результате этих измерений получают значения скоростей счета сигнала плюс фона n_{2i} , n_{3i} и скоростей счета фона b_{2i} , b_{3i} , соответствующие расстояниям R_2 , R_3 .

8. Обработка результатов измерений

8.1. Вычисляют значения плотности потока нейтронов, падающих на детектор с расстояний от источника нейтронов ^{252}Cf , равных R_j (конкретные значения расстояний R_1, R_2, R_3 получены при проведении измерений по п. 7 с точностью не хуже 0,5 %).

Значение плотности потока нейтронного излучения Φ_j на расстоянии R_j от источника с выходом (полным потоком в 4π) нейтронов Q , указанным в паспорте на источник, для случая открытой геометрии в воздухе, согласно закону обратных квадратов, определяют по формуле:

$$\Phi_j = \frac{K(\vartheta) \cdot K_t \cdot e^{\mu R} \cdot Q}{4\pi(R_j + R_{\text{эфф}})^2}, \quad (7.4)$$

где $K = e^{\frac{-0,69t}{T}}$;

T — период полураспада изотопа ^{252}Cf ;

t — время, прошедшее с момента последней аттестации источника;

μ — коэффициент ослабления потока нейтронов в воздухе (для источника ^{252}Cf $\mu = 0,81 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$);

$R_{\text{эфф}}$ — расстояние до эффективного центра детектора;

$K(\vartheta)$ — коэффициент асимметрии нейтронного излучения от ^{252}Cf (см. протокол метрологической аттестации стенда. Обычно принимают $K(\vartheta) = 1$).

Примечание. Расстояние до эффективного центра детектора $R_{\text{эфф}}$ берется из протокола метрологической аттестации или последней проверки стенда в случае, если конструктивные размеры аттестуемого детектора совпадают с таковыми для МРДИ-01. В противном случае значение $R_{\text{эфф}}$ определяется в соответствии с ГОСТ 8.355, приложение 1. Для определения значения $R_{\text{эфф}}$ измерения по п. 7.3 проводятся не в трех, а в пяти точках по расстояниям R_j . По полученным

результатам измерений строится график зависимости $1/\sqrt{\bar{n}_j - \bar{b}_j}$ от R_j (обозначения расшифрованы в п. 8.2). Через нанесенные точки проводится прямая до пересечения с осью абсцисс; точка пересечения с осью абсцисс покажет значение $R_{\text{эфф}}$.

8.2. Эффективность регистрации нейтронов детектором нейтронов рассчитывают для каждого значения расстояния $R_{\text{эфф}}$ по формуле:

$$\Phi_j = \frac{\bar{n}_j - \bar{b}_j}{\Phi_j} \text{ м}^2/\text{нейтр.}, \quad (7.5)$$

где Φ_j — значения плотности потока нейтронов из формулы (7.4);

\bar{n}_j — средние арифметические значения скорости счета сигнала плюс фона, вычисленные по результатам измерений по п. 7.3 для каждого j -го расстояния;

\bar{b}_j — средние арифметические значения скорости счета фона, вычисленные из результатов измерений по п. 7.3 для каждого j -го расстояния.

8.3. За результат измерения эффективности регистрации нейтронов детектором принимается среднее арифметическое значение из трех результатов измерения:

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \Phi_j, \text{ м}^2/\text{нейтр.} \quad (7.6)$$

Расхождение между максимальным и минимальным значениями Φ_j , равное

$$\Delta_p = \frac{\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}}{\overline{\Phi}} \cdot 100 \%,$$

не должно превосходить значения норматива оперативного контроля сходимости $d_1 = 5 \%$.

8.4. Результат измерений представляют в виде:

$$\overline{\text{Эф}}, \text{ м}^2/\text{нейтр}; \delta, \%; P = 0,95$$

или

$$\overline{\text{Эф}} \pm \Delta, \text{ м}^2/\text{нейтр}; P = 0,95,$$

где $\Delta = \delta \cdot \overline{\text{Эф}} / 100, \text{ м}^2/\text{нейтр}$.

Значение относительной погрешности измерения эффективности регистрации нейтронов детектором δ берется из результатов аттестации (или последней поверки) стенда. Результат измерений должен оканчиваться тем же десятичным разрядом, что и погрешность. Результаты измерений оформляются записью в журнале. Результаты измерений удостоверяются лицом, проводившим измерение, а при необходимости — руководителем организации (предприятия).

9. Контроль инструментальной погрешности измерений на стенде

Контроль инструментальной погрешности измерений на стенде проводят с использованием генератора импульсов типа Г5–54, работающего в режиме внешнего запуска, и частотомера типа ЧЗ–34 (рис. 4 в ТО). Импульсы синхронизации подают на генератор с частотомера.

Частота следования импульсов, задаваемых частотомером ЧЗ–34, должна быть близкой к частоте импульсов, измеренных при определении эффективности регистрации нейтронов детектором по п. 7.3.

Импульсы с генератора подают на вход контроллера (блока сопряжения) стенда. Амплитуда импульсов должна быть в 1,5 раза больше нижней границы амплитуд импульсов, регистрируемых стендом.

Выполняют измерения числа импульсов, поступающих с генератора, в течение 500 с. Такие измерения повторяют три раза.

Минимальное и максимальное значения скорости счета зарегистрированных на стенде импульсов не должны отличаться друг от друга на величину, большую, чем допускаемое расхождение d_2 , характеризующее сходимость измерений (значение d_2 устанавливается равным 0,5 %).

При превышении норматива оперативного контроля сходимости измерения повторяют. При повторном превышении указанного норматива d_2 выясняют причины, приводящие к неудовлетворительным результатам контроля, и устраняют их.

Оперативный контроль сходимости измерений выполняют при испытаниях каждого блока детекторов нейтронов.

В случае удовлетворительного выполнения условия оперативного контроля сходимости измерений скорости счета импульсов выполняют контроль погрешности измерений. Для этого рассчитывают среднее арифметическое значение по трем измерениям скорости счета импульсов \bar{n} и вычисляют разность между \bar{n} и n_q (калиброванной частотой повторения импульсов, задаваемой с тактового выхода частотомера), т.е. $\Delta_n = \bar{n} - n_q$.

Полученное значение разности не должно превышать норматива (значения) погрешности при измерении скорости счета импульсов, указанного в свидетельстве о метрологической аттестации стенда. При превышении норматива погрешности измерения повторяют. При повторном превышении указанного норматива выясняют причины и устраняют их.

Библиографический список к лабораторной работе № 7

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ 99/2010. Москва : Минздрав России, 2010. 86 с.
2. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Москва : Минздрав России, 2009. 88 с.

3. Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки. ГОСТ 8.355–79. Москва : Госстандарт, 1979.

Содержание отчета

Студенты представляют по проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы детектора нейтронов (кратко);
- первичные результаты измерений основных технических характеристик (ОТХ) детектора нейтронов;
- результаты обработки первичных данных и результаты определения погрешности измерений;
- выводы по результатам измерений в соответствии с п. 8.4 методики, представленной выше.

Оглавление

Условные обозначения	3
Лабораторная работа № 1. Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений.....	5
Лабораторная работа № 2. Измерения основных характеристик счетчиков нейтронов ПД-631 М	32
Лабораторная работа № 3. Измерения основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических на установке СПЕКТР 1	44
Лабораторная работа № 4. Носимый радиационный монитор (НОРМ)	59
Лабораторная работа № 5. Комплекс СРК «Соратник-01». Изучение устройства и особенностей эксплуатации. Решение задач обнаружения ИИИ	74
Лабораторная работа № 6. Комплекс СРК «Соратник-01». Решение задач обнаружения и идентификации радионуклидов	78
Лабораторная работа № 7. Измерения основных технических характеристик детекторов нейтронов	83

Учебное издание

Петров Владимир Леонидович

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Н. П. Кубыщенко
Верстка Е. В. Ровнушкиной

Подписано в печать 23.10.2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 5,81.
Уч.-изд. л. 4,4. Тираж 50 экз. Заказ 224.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Для заметок

